

杨 进 刘书杰 姜 伟 谢仁军 著

ANSYS

在海洋石油工程中的应用

ANSYS ZAI HAIYANG SHIYOU GONGCHENG ZHONG DE YINGYONG



石油工业出版社



ANSYS

ANSYS ZAI HAIYANG SHIYOU GONGCHENG ZHONG DE YINGYONG

责任编辑：王金凤

封面设计：赛维钰

责任校对：王安强



ISBN 978-7-5021-7576-4



9 787502 175764 >

定价：52.00 元

ANSYS

在海洋石油工程中的应用

■ 杨 进 刘书杰 姜 伟 谢仁军 著

石油工业出版社

内 容 提 要

ANSYS 软件是融结构、流体、热、电场、磁场、声场于一体的大型 CAE 通用有限元分析软件。本书详细介绍了海洋环境载荷的基本理论及利用 ANSYS 软件的强大功能对承受环境载荷的海上石油工程结构物进行力学特性计算的分析方法。主要包括隔水导管结构、简易平台桩腿、桩土相互作用、单筒多井结构及大型导管架结平台等。结合实例详细介绍了各种海洋石油结构物的静力、模态及动力有限元分析过程。

本书能够为从事海洋工程及海上石油工程安全评价的研究人员提供指导作用,同时也为有关院校师生提供学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 在海洋石油工程中的应用 / 杨进, 刘书杰, 姜伟等著.

北京: 石油工业出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-5021-7576-4

I. A...

II. 杨...

III. 海上石油开采 - 有限元分析 - 应用程序

IV. TE53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 234221 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 328 千字

定价: 52.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

海洋石油工程从某种意义上说是一种特殊的石油工程，因为有一层海水的存在使其具有高风险、高成本与高科技的特点。处于海洋环境中的石油结构物承受着极其复杂的载荷情况，合理的设计与计算对于海洋石油的开采有着非常重要的影响。随着计算机技术的发展，有限元技术在海洋石油工程中得到了广泛的应用。ANSYS 软件作为一种大型 CAE 通用有限元分析软件，在海洋石油工程诸多方面都能够发挥优势作用。但是目前还未见有专门介绍 ANSYS 软件在这方面应用的书籍。因此，作者结合近些年来所从事的科研项目中的的一些工程实际问题，系统地介绍了 ANSYS 软件在海洋石油工程中应用的基本理论、工程应用实例等问题。

本书以实际工程实例为主导，向读者系统地介绍了基于 ANSYS 软件在海洋石油工程结构物分析中的应用。在内容组织上分为理论基础篇和工程实例篇两大部分。在理论基础篇中介绍了包括海洋环境载荷基本理论和海洋结构物分析过程中所用到的 ANSYS 单元及本书中所涉及的结构分析方法，目的在于让读者不仅学会如何利用软件对结构物进行分析，还对结构物所承受的环境载荷理论有一定程度的熟悉和掌握。在工程实例篇中介绍了包括海洋石油工程结构物中比较典型的工程结构物，如钻井隔水导管、简易平台桩腿结构、桩土相互作用、单筒多井结构及大型导管架结平台等内容。

从内容安排上遵循从简单到复杂的顺序，首先结合简单的隔水导管问题，向读者详细介绍 ANSYS 的静力分析过程，逐步深入地将 ANSYS 的非线性问题、模态分析、瞬态动力分析等问题通过具体实例进行详细的讲述。在对工程实例进行 ANSYS 分析操作时，将 ANSYS 窗口操作及 APDL 命令流相结合，让读者同时了解这两种操作方式的联系与区别，每个工程实例都附有完整的 APDL 命令流，为方便读者在学习完本书之后，如果要进行相类似的工程问题分析时，可以直接应用部分命令流，为读者节省时间。

在本书编写过程中，中海石油（中国）有限公司钻完井办公室的董星亮、谢梅波、张春阳、周俊昌等同志提供了大量的技术指导，中海石油（中国）有限公司北京研究中心侯金林、王平双、周建良、何保生、李嗣贵、曹砚峰、辛雪松等同志提供了软件平台和技术指导，天津分公司刘良跃、邓建明、赵景芳、范白涛、马英文、张晓晟、刘鹏、许杰等同志提供了大量渤海海域资料和

现场应用，深圳分公司唐海雄、韦红术、汪顺文、张俊斌、林海春、苏峰等同志提供了大量南海东部现场资料和指导，湛江分公司谢玉洪、李中、张勇、黄凯文、黄熠、段泽辉、郭永宾、方满宗等同志提供了大量的南海西部海域资料和现场应用，上海分公司郭士生、罗勇等同志提供了大量东海海域资料和现场应用，中海油海洋工程有限公司崔玉军、杨晓刚等同志提供了大量导管架平台资料和现场应用指导，在此表示衷心感谢。

另外，十分感谢 ANSYS 软件研发和经销商，为解决海洋石油工程问题提供了优秀的计算分析平台，为本书的出版提供了必要的条件。

由于本书涉及内容较多，加之编者的水平有限，本书定有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2010 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 ANSYS 软件概述	1
1.1.1 ANSYS 的发展历史	1
1.1.2 基本功能与分析过程	2
1.2 海洋石油工业发展现状	6
1.2.1 我国海洋石油发展现状	6
1.2.2 海洋结构物的发展历史及应用背景	7
1.2.3 海洋石油工程的研究进展	8

上篇 海洋结构物 ANSYS 分析基础理论

2 环境载荷理论基础	11
2.1 海风载荷	11
2.1.1 设计风速	11
2.1.2 风力表达式	12
2.2 海流载荷	13
2.2.1 海流分类	13
2.2.2 海流力计算	13
2.3 波浪力	15
2.3.1 波浪力分类	15
2.3.2 波浪力计算	15
2.4 海冰载荷	17
2.4.1 海冰载荷的研究方法	17
2.4.2 海冰力计算	19
2.5 地震作用	21
2.5.1 地震作用理论	21
2.5.2 ANSYS 地震分析方法	23
2.6 本章小结	23
3 ANSYS 结构有限元分析基础	24
3.1 海洋结构物分析常见的 ANSYS 单元类型介绍	24
3.1.1 PIPE16 单元特性介绍	24
3.1.2 PIPE20 单元特性介绍	27
3.1.3 PIPE59 单元特性介绍	29
3.1.4 BEAM4 单元特性介绍	33
3.1.5 SHELL43 单元特性介绍	37
3.1.6 COMBIN39 单元特性介绍	37

3.1.7 SOLID45 单元特性介绍	38
3.1.8 MASS21 单元特性介绍	39
3.2 ANSYS 结构分析基本类型	39
3.2.1 结构静力分析	39
3.2.2 结构模态分析	42
3.2.3 瞬态动力学分析	44

下篇 工程实例篇

4 钻井隔水导管结构静力分析	49
4.1 钻井隔水导管概述	49
4.1.1 隔水导管力学分析模型	49
4.1.2 隔水导管的 ANSYS 有限元分析步骤	49
4.2 工程实例：浅海水域隔水导管结构静力分析	50
4.2.1 前处理	50
4.2.2 求解计算	56
4.2.3 结果分析	60
4.3 波浪相位角搜索实例	64
4.3.1 基本过程	64
4.3.2 实例分析	65
4.4 本章小结	65
5 平台桩腿与海底土相互作用模拟	70
5.1 桩土相互作用概述	70
5.2 $P-y$ 曲线理论	71
5.2.1 软黏土中的 $P-y$ 曲线	71
5.2.2 砂土中的 $P-y$ 曲线	72
5.2.3 硬黏土中的 $P-y$ 曲线	74
5.3 $P-y$ 曲线法的 ANSYS 实现	74
5.4 工程实例：平台桩土相互作用分析	75
5.4.1 前处理过程	76
5.4.2 静力求解计算	80
5.4.3 结构模态分析	85
5.5 本章小结	89
6 隔水导管抗冰极限承载力分析	95
6.1 隔水导管结构概述	95
6.2 工程实例：隔水导管抗冰极限承载力弹塑性分析	95
6.2.1 模型简化	96
6.2.2 前处理	96
6.2.3 求解计算	108
6.2.4 结果分析	111
6.3 本章小结	122

7	单筒三井简易平台桩腿结构力学分析	128
7.1	单筒三井结构概述	128
7.2	工程实例: 单筒三井结构平台桩腿动力分析	129
7.2.1	模型建立	130
7.2.2	静力分析求解	134
7.2.3	动力分析	137
7.3	本章小结	143
8	深水隔水导管与导向孔相互作用分析	149
8.1	隔水导管导向孔简述	149
8.2	工程实例: 某油田隔水导管与导向孔相互作用研究	150
8.2.1	模型建立	150
8.2.2	静力分析	153
8.2.3	结构模态分析	160
8.3	本章小结	163
9	导管架平台整体结构分析	168
9.1	平台整体模型建立	169
9.1.1	工程实例基本数据	169
9.1.2	导管架平台结构特点	169
9.1.3	平台几何模型的建立	170
9.1.4	平台有限元模型划分	173
9.2	波流耦合作用下导管架平台整体结构静力分析	173
9.2.1	波流耦合力极值	173
9.2.2	结构整体静力分析	175
9.2.3	静力结果分析	175
9.3	导管架平台整体结构模态分析	177
9.3.1	结构模态计算	177
9.3.2	观察模态分析结果	178
9.4	波浪作用下平台结构瞬态动力分析	180
9.4.1	瞬态动力分析	180
9.4.2	动力分析结果处理	181
9.5	本章小结	183
	参考文献	198

1 绪 论

◇ 本章导读

学习 ANSYS 软件之前,首先需要对该软件有一个比较清楚的认识,本章将对 ANSYS 软件进行简要的概述,接着对目前海洋石油工程的发展进行介绍。目的是使读者在了解 ANSYS 软件的同时对海洋石油的发展有一个更深刻的认识,为后续的分析奠定基础。

本章主要包括以下两个内容:

- ANSYS 软件概述。
- 海洋石油工业的发展现状。

1.1 ANSYS 软件概述

ANSYS 软件是融结构、流体、热、电场、磁场、声场于一体的大型 CAE 通用有限元分析软件。由美国 ANSYS 软件公司开发,是第一个通过 ISO 9001 质量认证的分析设计类软件,是美国机械工程师协会 (ASME)、美国核安全局 (NQA) 及近十个专业技术协会认证的标准分析软件,广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究。功能强大、使用灵活。该软件可在大多数计算机及操作系统(如 Windows、UNIX、Linux)中运行,从 PC 机到工作站直至巨型计算机,ANSYS 文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。它开发了第一个集成的计算流体动力学 (CFD) 功能,也是第一个且是唯一一个开发了多物理场分析功能的软件。ANSYS 多物理场耦合的功能,允许在同一模型上进行各式各样的耦合计算,例如,热—结构耦合、磁—结构耦合以及电—磁—流体—热耦合,在 PC 机上生成的模型同样可运行于巨型计算机上,这样就确保了 ANSYS 对多领域多变工程问题的求解。

1.1.1 ANSYS 的发展历史

ANSYS 公司从建立之初到现在,已有将近 40 年的历史。公司成立于 1970 年,总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡。近 40 年来,ANSYS 公司一直致力于设计分析软件的开发,不断吸取新的计算方法和计算技术,领导着世界有限元技术的发展,并为全球工业广泛接受,其用户遍及全世界各地。

ANSYS 软件的第一个版本仅提供了热分析及线性结构分析功能,像当时的大多数程序一样,它只能是一个批处理程序,且只能在大型计算机上运行。

20 世纪 70 年代初,ANSYS 软件中融入了新的技术以及用户的要求,从而使程序发生了很大的变化,非线性、子结构以及更多的单元类型被加入到子程序。70 年代末,交互方式的加入是该软件最为显著的变化,它大大地简化了模型生成和结果评价。在进行分析之前,可用交互式图形来验证模型的几何形状、材料及边界条件;在分析完成之后,计算结

果的图形显示，立即可用于分析检验。

目前该软件已发展到 ANSYS 11.0 版本，其功能更加强大，使用更加便利。ANSYS 分析模拟工具易于使用、支持多种工作平台。同时该软件提供了一个不断改进的功能清单，包括：结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体动力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分、大应变 / 有限元转动功能以及利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 的扩展宏命令功能。

1.1.2 基本功能与分析过程

1.1.2.1 基本功能

ANSYS 软件主要包括三个部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型。软件提供了 100 种以上的单元类型，可以用来模拟工程中的各种结构和材料。

分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力。

后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示等图形方式显示，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

启动 ANSYS，进入主界面（见图 1.1）以后，程序停留在主程序界面。从主菜单可以进入各处理模块：PRE7（通用前处理模块），SOLUTION（求解计算模块），POST 1（通用后处理模块），POST26（时间历程后处理模块）。ANSYS 用户手册的全部内容都可以联机查阅，可以通过 ANSYS 帮助系统查看所有的单元介绍、基本原理等信息。

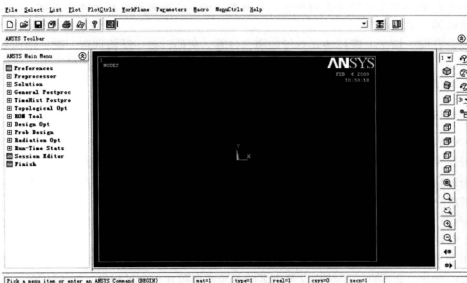


图 1.1 ANSYS 主界面

用户的指令可以通过鼠标单击菜单项选取和执行,也可以在命令输入对话框通过键盘输入。命令一经执行,该命令就会在 LOG 文件中列出,打开输出对话框可以看到 LOG 文件的内容。如果软件运行过程中出现问题,查看 LOG 文件中的命令流及其错误提示,将有助于快速发现问题的根源。LOG 文件的内容可以略作修改存到一个批处理文件中,在以后进行同样工作时,由 ANSYS 自动读入执行,这是 ANSYS 软件的第二种命令输入方式。这种命令方式在进行某些重复性较高的工作时,能有效地提高工作速度。软件提供了 100 种以上的单元类型,用来模拟工程中的各种结构和材料。

1.1.2.2 分析过程

了解 ANSYS 的基本知识之后,下面就来介绍在 ANSYS 中进行结构有限元分析的一般流程。一般地,一个完整的 ANSYS 结构分析过程包括下面一些基本操作和环节。

(1) 前处理过程。

前处理是整个分析过程的开始阶段,其目的是在于建立一个符合工程实际情况的结构有限元分析模型,为后继的分析创建对象。双击实用菜单中的 **【Preprocessor】**,进入 ANSYS 的前处理模块。这个模块主要包含如下几个操作环节。

① 分析环境设置。

进入 ANSYS 分析环境界面后,指定分析的工作名称以及图形显示的标题,开始一个新的结构分析。

② 定义单元类型、实常数及材料模型。

定义在分析过程中需要用到的单元类型,对于单元类型的选择,一般要结合工程实际情况及 ANSYS 单元库相应单元的属性进行选择,遵循所选择的单元类型要能够反映实际问题特性的原则。单元类型定义完成后,需要设置相关的单元实常数(如:梁单元的横截面面积、惯性矩,管单元的外径、壁厚等),指定分析中所用到的材料模型以及相关的材料参数(如:弹性模量、泊松比、密度、屈服极限等)。

③ 建立几何模型及网格划分。

建立几何模型就是要建立一个与实际结构外形大致相同(程度由结构的简化原则而定)的几何图形元素组合体。ANSYS 程序提供了两种实体建模方法:自顶向下模式与自底向上模式。

自顶向下进行实体建模时,用户定义一个模型的最高级图元,如球、棱柱,称为基元,程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型,如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱体结构。无论使用自顶向下还是自底向上方法建模,用户均能使用布尔运算来组合数据集,从而得到一个实体模型。ANSYS 程序提供了完整的布尔运算,诸如相加、相减、相交、分割、黏结和重叠。在创建复杂实体模型时,对线、面、体、基元的布尔操作能减少大量的建模工作量。ANSYS 程序还提供了拖拉、延伸、旋转、移动和拷贝实体模型图元的功能。附加的功能还包括圆弧构造、切线构造,通过拖拉与旋转生成面和体、线与面的自动相交运算、自动倒角生成,用于网格划分的硬点的建立、移动、拷贝和删除等操作。

自底向上进行实体建模时,用户从最低级的图元向上构造模型,即:用户首先定义关键点,然后依次是相关的线、面、体。ANSYS 程序提供使用便捷、高质量的对 CAD 模型进行网格划分功能,包括四种网格划分方法:延伸划分、映像划分、自由划分和自适应划

分。延伸网格划分可将一个一维网格延伸成一个二维网格。映像网格划分允许用户将几何模型分解成简单的几部分,然后选择合适的单元属性和网格控制,生成映像网格。ANSYS 程序的自由网格划分器功能是十分强大的,可对复杂模型直接划分,避免了用户对各个部分分别划分然后进行组装时各部分网格不匹配带来的麻烦。自适应网格划分是在生成了具有边界条件的实体模型以后,用户指示程序自动地生成有限元网格,分析、估计网格的离散误差,然后重新定义网格大小,再次分析计算、估计网格的离散误差,直到误差低于用户定义的值或达到用户定义的求解次数。

④定义边界条件及约束条件。

在上述的有限元模型上,引入实际结构中的边界条件,自由度之间的耦合关系以及其他的一些约束条件。

注意:定义边界条件及约束条件也可以在求解模块中设置。另外,在 ANSYS 建模过程中,也可以直接由建立节点的方式直接建立单元模型。

(2) 求解过程。

前处理阶段完成建模以后,用户可以在求解阶段获得分析结果。单击快捷工具区的【SAVE DB】将前处理模块生成的模型存盘退出【Preprocessor】,单击实用菜单项中的【Solution】进入分析求解模块。在该阶段,用户可以定义分析类型、分析选项、载荷数据和载荷步选项,然后开始有限元求解。

①设定分析类型。

ANSYS 软件提供的分析类型如下。

结构静力分析:用来求解外载荷引起的位移、应力和力。静力分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响不显著的问题。ANSYS 程序中的静力分析不仅可以进行线性分析,而且也可以进行非线性分析,如塑性、蠕变、膨胀、大变形、大应变及接触分析。

结构动力学分析:结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力分析不同,动力分析要考虑随时间变化的力载荷以及它对阻尼和惯性的影响。ANSYS 可进行的结构动力学分析类型包括:瞬态动力学分析、模态分析、谐波响应分析及随机振动响应分析。

结构非线性分析:结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例变化。ANSYS 程序可求解静态和瞬态非线性问题,包括材料非线性、几何非线性和单元非线性三种。

动力学分析:ANSYS 程序可以分析大型二维柔体运动。当运动的积累影响起主要作用时,可使用这些功能分析复杂结构在空间中的运动特性,确定结构中由此产生的应力、应变和变形。

热分析:程序可处理热传递的基本类型为传导、对流和辐射。热传递的两种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。热分析还具有可以模拟材料固化和熔解过程的分析能力以及模拟热与结构应力之间的热—结构耦合分析能力。

流体动力学分析:ANSYS 流体单元能进行流体动力学分析,分析类型可以为瞬态或稳态。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率,并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。另外,还可以使用二维表面效应单元和热一流管单元模拟结构的流体绕流,包括对流换热效应。

对于上述众多分析类型,在实际分析中可以根据问题的性质选择不同的分析类型。下面列出常见的结构分析类型及类型编号,如表 1.1 所示。

表 1.1 ANSYS 结构分析类型

数字代码	分析类型
0	STATIC (静力分析)
1	BUCKLE (屈曲分析)
2	MODAL (模态分析)
3	HARMIC (谐载荷响应分析)
4	TRANS (瞬态动力分析)
5	SUBSTR (子结构分析)
6	SPECTR (谱分析)

在选定分析类型后,需要设置相关的参数,比如分析所用到的求解器类型、非线性选项和迭代次数设置、模态分析的模态提取方法和模态扩展数等各种分析选项。

②定义载荷信息。

ANSYS 结构分析的载荷包括位移载荷、集中力(包括弯矩)、表面载荷、体积载荷、惯性力以及耦合场载荷(如热应力)等。可以将结构分析的载荷施加到几何模型上或者有限元模型上。

施加在几何模型上的载荷是独立于有限元网格的,当在划分网格时,是不会影响到已经施加的载荷的。施加到有限元模型上的载荷网格修改时将会失效,需要删除之前的载荷并在新的网格上重新定义载荷。对于施加在几何实体模型上的载荷,ANSYS 程序自动将其转换到有限元模型上进行求解。

③求解计算。

在施加了载荷并设置了相关的分析选项之后,即可调用求解程序开始求解。在求解过程中,可以通过屏幕窗口获取计算过程的一些相关信息,诸如载荷步、收敛曲线等。

(3) 后处理过程。

ANSYS 软件的后处理过程包括两个部分:通用后处理模块 POST1 和时间历程响应后处理模块 POST26。通过友好的用户界面,可以很容易获得求解过程的计算结果并对其进行显示。这些结果包括位移、温度、应力、应变、速度及热流等,输出形式可以有图形显示和数据列表两种。

①通用后处理模块 POST 1。

单击菜单项中的【General Postproc】选项即可进入通用后处理模块。此模块能对前面的分析结果以图形方式显示和输出,例如,计算结果(如应力)在模型上的变化情况可用等值线图表示,不同的等值线颜色,代表了不同的值(如应力值)。用不同的颜色代表不同的数值区(如应力范围),清晰地反映了计算结果的区域分布情况。

②时间历程响应后处理模块 POST 26。

单击实用菜单项中的【TimeHist Postprc】选项即可进入时间历程响应后处理模块。这个模块用于检查在一个时间段或一个子步历程中的结果,如节点位移、应力或支座反力。这些结果能通过绘制曲线或列表查看,绘制一个或多个变量随频率或其他量变化的曲线,

有助于形象化地表示分析结果。另外, POST26 还可以进行曲线的代数运算。

综上所述, 对 ANSYS 结构分析的基本过程进行了简单的介绍, 希望读者能够对 ANSYS 分析的基本过程有一个初步的认识。

1.2 海洋石油工业发展现状

据统计, 世界海洋石油资源量占全球石油资源总量的 34%, 全球海洋石油蕴藏量约 $1000 \times 10^4 \text{t}$, 其中已探明的储量约为 $380 \times 10^4 \text{t}$ 。目前全球已有 100 多个国家在进行海上石油勘探。根据国际能源署 (IEA) 统计: 2003 年世界海洋石油生产量达 $12.57 \times 10^4 \text{t}$, 约占世界石油总生产量的 34.1%, 1992 年世界海洋石油生产量所占份额为 26.5%, 2002 年提高到 34%。2003 年世界海洋石油生产量比上年增长 3.7%, 高于世界石油生产量 3.5% 的增长率。1992—2002 年世界石油生产量年均增长率为 1.1%。在 3.7% 的增长速度下, 世界海洋石油产量的增长速度是世界石油生产总量增速的 3 倍多。但是, 另一方面全球的石油需求量增长更为迅猛。

目前, 全球油气储量增长乏力, 远远无法弥补每年的产量, 然而全球的石油消费量仍将以较快的速度增长。未来巨大的油气需求将如何得以满足, 这是摆在世界石油工业面前的一个大难题。根据 BP2005 年能源统计资料, 全球对于石油的需求正在强劲增长。1981 年的石油消费量为 $29.9 \times 10^4 \text{t}$, 而到 2004 年已达到 $40.4 \times 10^4 \text{t}$ 。而且, 根据国际能源署 (IEA) 发布的世界能源展望预测, 2000—2030 年, 世界石油需求预计年均增长 1.6%, 其中到 2030 年达到 $57.69 \times 10^4 \text{t}$ 。未来油气仍将在世界一次能源需求中居主导地位, 到 2030 年油气需求占世界一次能源总需求的 65%, 2030 年 $99.72 \times 10^4 \text{t}$ 油当量的油气需求要得以满足, 再加上陆上石油资源危机问题日渐突出, 因此急需寻找储量的接替区域, 而未来石油界的希望应该在海上。

1.2.1 我国海洋石油发展现状

我国从 1993 年开始, 原油供应量满足不了市场需求, 因而从石油出口国变为石油进口国。2005 年我国的原油进口量已达到 $9000 \times 10^4 \text{t}$, 石油已成为我国的稀缺能源。为满足国民经济和社会发展的需要, “十一五” 期间将进一步加强石油天然气资源的勘探, 增加后备储量, 扭转探明储量入不敷出和石油产量徘徊的局面。石油天然气资源是发展石油工业的前提条件和基础, 探明储量是制定石油工业长期发展规划和建设项目的依据, 剩余可采储量的多少决定了石油工业发展潜力所在。目前我国陆上石油后备资源严重不足, 原油产量增长缓慢。由于长期的强化开采, 大多数主力油田在基本稳定基础上陆续进入产量递减阶段, 开采条件恶化, 开发难度增大。受各种因素影响, “九五” 和 “十五” 探明石油储量都没有完成计划, 石油可采储量年增长量小于当年采出量, 油气资源的接替依然紧张。因此, 在 “十一五” 期间, 将继续加强石油天然气资源勘探, 增加后备储量。鉴于陆上资源的日渐枯竭, 资源开发向海洋、尤其是深海进军已成必然趋势。

我国海洋石油工业开始于 20 世纪 60 年代末期, 最早的海洋石油开发起步于渤海湾地区, 该地区典型水深约为 20m。到了 80 年代末期, 在南中国海的联合勘探和生产开始在 100m 左右水深的范围内进行。现在我国也准备加快南中国海油气资源的勘探开发, 但这一海域水深在 500 ~ 2000m, 而我国目前还不具备在这样水深海域进行油气勘探和生产的

技术,因此迫切需要发展深海油气勘探和开发技术。鉴于此,由国家发展改革委员会牵头,组织中石油、中石化、中海油三大公司参与,投入大量资金,共同研究深海海洋油气开发技术。目前,中石油已获批准在南中国海 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的海域勘探和开发油气资源,并以辽河油田和大港油田为基地成立了海洋石油工程公司。中海油也已获批准在南中国海 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的海域勘探和开发油气资源,并且已有 8 个区块开始向全球招商,积极寻求外部合作。另外,其子公司中海油服股份公司也投入巨资开始建造深水钻井平台,并正积极准备建造 1500m 作业水深的半潜式平台。

我国深海海域海洋石油资源丰富。据美国能源信息署报道,在南中国海拥有丰富的油气资源,被称为另一个波斯湾。对南中国海油气资源量的估算中外差距较大,1993 年美国地质调查局对南中国海地区海上盆地的资源所做的估计为:石油 $280 \times 10^8 \text{ bbl}$,天然气 $266 \times 10^{12} \text{ m}^3$,而其他西方国家乐观的估计仅为:石油 $100 \times 10^8 \text{ bbl}$,天然气 $35 \times 10^{12} \text{ m}^3$;而我国的估计为:石油 $1050 \times 10^8 \text{ bbl}$,天然气 $2000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。最有潜力的含油气盆地曾母暗沙盆地、万安盆地、南撒盆地和东纳土纳盆地。目前在南中国海地区的大多数国家均有油气发现,估计探明的石油储量约 $77 \times 10^8 \text{ bbl}$,天然气储量约 $4.36 \times 10^{12} \text{ m}^3$,石油产量约 $175 \times 10^4 \text{ bbl/d}$,天然气产量约 $710.33 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 。印度尼西亚、菲律宾、马来西亚和越南都在南中国海地区有重要的油气发现。

1.2.2 海洋结构物的发展历史及应用背景

地球上 71% 的表面被海洋所覆盖。对于人类来讲,海洋是一个巨大的财富,尤其是伴随着工业的发展,人们对能源的需求量与日俱增,陆地上有限的能源已逐渐不能满足人类的需求,因此,开发海洋资源已成为人们的当务之急。

1896 年,美国人以线桥连陆方式在加利福尼亚距海岸 200 多米打出了第一口海上油井,它标志着海上石油工业的诞生。到了 20 世纪 40 年代成功建造了第一座专门用于海洋石油钻探开采的平台,工作水深只有 7m。这项技术进一步使得海上石油工业出现了突飞猛进的快速发展。到了 1979 年全世界近海共有 7000 余座固定式海洋石油钻探生产平台。

第二次世界大战后,海洋石油钻探开采技术突飞猛进,可开发深度越来越深,并能在各种复杂的海况下开采石油。20 世纪 50 年代以后,成功研制了各种移动式钻井平台,克服了固定式平台不能重复使用的缺点,并大大增加了工作水深。移动式海洋石油钻井设备拥有自己的浮力结构,可以有拖船拖着移动,有的还用自有的动力设备,可以自航。固定式平台固定在海底,工作水深受限。移动式平台使用锚缆定位和动态定位,工作深度可达到 200m 以上,但是稳定性较差。为了向深水石油开发进军,各国竞相研究稳定又廉价的深水平台。张力腿平台用绷紧的钢索系留,工作水深可达到 600 ~ 900m。

进入 20 世纪 70 年代,海上石油平台数量猛增,特别是半潜式平台。1965 年还只有 70 座,截至 1976 年浮动石油平台已超过 350 台,遍布世界各个沿海区域。

随着石油平台数量的增加,海洋石油产量也随之增加。到 20 世纪 80 年代中期,海洋石油产量已占世界石油产量的三分之一。截至目前,海洋石油产量在世界石油产量中的百分比还在增加。此外,随着海洋开发事业的迅速发展,海洋平台得到广泛的应用,如海上石油钻井、海上施工、生活、地质勘察、海底管道铺设、海上起重、海上打桩、机场、海上工厂等都可以采用海洋平台。

注: $1 \text{ bbl} = 0.159 \text{ m}^3$ 。

1.2.3 海洋石油工程的研究进展

随着海洋石油的发展,近几年围绕着海洋石油生产中出现的若干问题,我国工程界积极开展相应的研究工作,在环境、载荷、结构、检验、维修工艺以及海洋工程设备等方面取得了长足的进展,海洋石油的开采技术已有很大提高,开采的范围也逐渐从浅海向深海发展,并正在以下几个方面进行深入的研究。

(1) 深海石油平台技术的研究。

深海石油平台的设计、建造及相关技术是深海油气资源开发中的关键技术之一,了解和掌握国外深海平台的建造和使用情况,探讨国外深海平台设计和使用中积累的经验,对我国海洋油气开发具有重要意义。对深水开采,钢质导管架平台的造价会随水深增加而急剧增长,以致在经济上不可行。这就促使在深海开发中使用新的结构形式,如混凝土结构和浮式结构。典型的浮式结构是 FPSO、半潜式平台、张力腿平台(TLP)和 SPAR 平台。

目前,我国海洋工程界对 FPSO 与半潜式平台的了解较多,技术也相对成熟。而对 TLP 和 SPAR 平台却了解较少,也没有设计、建造和使用的经验。因此,目前的研究重点将是 TLP 和 SPAR 平台,研究的内容主要有:平台的环境载荷计算及环境参数选取;平台的稳定性与运动;平台的结构强度与有限元技术;平台的结构疲劳强度与断裂;平台的检验技术等。

(2) 推动风险分析与综合安全评估技术在生产及检验中的应用。

海洋石油结构物复杂、体积庞大、造价昂贵,所处的海洋环境十分复杂和恶劣,风、海浪、海流、海冰和潮汐时时作用于结构,同时还受到地震作用的威胁。在此环境条件下,环境腐蚀、海生物附着、地基土冲刷和基础动力软化、材料老化、构件缺陷和机械损伤以及疲劳和损伤累积等因素,都将导致平台结构构件和整体抗力的衰减,影响结构的服役安全性和耐久性。另外,操作不当、管理不当等人为因素也直接影响海洋石油平台的安全性。随着对海洋平台复杂性的深入了解,越来越认识到海洋结构物结构性和系统性风险分析的必要性。历史上曾有多次海洋平台的事故,造成了重大的经济损失和不良的社会影响。例如,1965 年英国北海的“海上钻石”号钻井平台支柱拉杆脆性断裂导致平台沉没;1968 年“罗兰角”(Rowlandhorn)号钻井平台事故;1969 年我国渤海 2 号平台被海冰推倒,造成直接经济损失 2000 多万元;1997 年渤海 4 号烽火平台倒毁;1980 年北海 Ekofisk 油田的 Alexander L Kiehlund 号五腿钻井平台发生倾覆,导致 122 人死亡;以及 2001 年巴西油田的 P-36 平台发生倾覆。这些惨痛的教训给海洋资源开发以很大的警示,同时也促使国内外石油部门更加努力地研究海洋平台安全管理的关键科学问题。

因此,我国正积极准备开展对海洋平台的各种风险进行分析、识别及评估,确定风险控制方案,保证平台安全生产,并最终在费用和收益之间达到协调,这将为我国海洋油气资源的安全开采提供科学可靠的保证。平台风险分析与综合安全评估的目标就是要发展一种基于风险分析的、结构化的系统方法,目的是要全面地、综合地考虑影响安全的诸方面因素,除考虑平台结构的检测、维护和管理,还要考虑如何从组织管理上、设备管理上、制度管理上、人为因素以及操作规程上保证平台的安全运行。研究如何对海洋平台的各种危险进行识别、评估,并通过风险评估、费用和收益评估,提出合理的并能有效地控制风险的措施,从而进一步确定风险控制方案,在费用和收益之间达到协调,并最终为决策者提出意见和建议。

上 篇

海洋结构物

ANSYS 分析基础理论

2 环境载荷理论基础

◇ 本章导读

海洋石油开发的所有活动都离不开海水存在的环境，因此对于海洋石油工程结构物而言，就要受到来自海洋各种环境载荷的影响，本章将对海洋结构物所受到的风、海流、波浪、海冰以及地震等基本理论进行介绍。

本章主要包括如下的5个内容：

- 海风载荷；
- 海流载荷；
- 波浪力；
- 海冰载荷；
- 地震作用。

海洋石油的勘探开发与陆地石油勘探开发的最大区别在于各自所处的环境不同，海洋石油的勘探开发面临着极其复杂的环境条件，诸如海风、海流、海浪、海冰、浅层气以及其复杂的海底地形情况。

因此，海洋石油结构物的主要特点之一是承受由海洋环境所带给的载荷。这些作用在结构物上的外力可以分成作用力和反作用力。作用力是使结构物产生运动倾斜的力；反作用力是抵抗使设备运动倾斜的力。虽然海洋石油结构物在所有这些力作用下必须保持平衡，但是其内效应力及应变等却直接关系着设备本身的强度。因此，要研究海洋石油结构物的强度计算问题，必须要首先正确解决海洋环境载荷的计算问题，本章即围绕着这一问题进行介绍，为后续的海洋石油结构物计算奠定理论基础。海上结构物所承受的环境载荷主要有风压力、波浪力、冰压力、地震力及其反作用力等，此外在随机海浪的作用下，还有其动力反应问题。

2.1 海风载荷

大风对海洋石油结构物的工作影响很大，风力随着季节及地区的不同而有所区别。我国东南沿海夏季受台风的威胁较大；北部沿海冬季受蒙古及西伯利亚寒流影响较大，风力最大可达12级，其风速是33m/s，风压约为1060Pa；例如，1978年9月25日，我国南海二号半潜式钻井平台正在台风中心附近，当时平均风速达50节（约为25.7m/s）而最大风速达82节（约为43.14m/s）。对于海洋石油结构物进行强度计算时，一般取风压不得小于800Pa。

2.1.1 设计风速

在进行海洋石油结构物设计过程中使用的风速，应取决于长期的实测资料，在本质上

风载荷是动态的,但一些结构对它的反应几乎为静态形式。比如,对一个在比较浅水域中的固定钢结构导管架,相对于总的载荷来说,风力是很小的(一般低于10%)。持续风速用于计算整个平台的风载荷,而阵风风速则用于单个结构构件的设计。

风速和方向随空间和时间不断的变化而变化。在尺度上,对于典型的较大的海洋结构,1h持续时间量级上风的统计性质(如风速的平均值和标准差)在水平面内并不变化,但在高度方向上变化。在长持续时间内,存在具有高的平均风速的较短持续时间(阵风系数)。因此,只有限定风的高程和持续时间,风速才有意义。

一般情况下,参考值 $v(1h, z_R)$ 是在高程 z_R 为10m处的1h的平均风速。在高程 z 处1h的风速的平均垂向分布可以由下式近似确定:

$$v(1h, z) = v(1h, z_R) \left(z/z_R \right)^{0.125} \quad (2.1)$$

计算单个杆件最大的静风载时采用3s的阵风风速;对于水平方向上尺寸不超过50m结构的最大风载荷的计算,宜采用5s的阵风风速;计算更大结构上的总静风载时宜采用1min持续风速计算上部结构总的静风载,此时,结构物在风激作用下可能产生动力响应,但并不需要做仔细的风动力分析,对风动力响应可忽略的结构,宜采用1h的持续风速和最大的波浪力。

2.1.2 风力表达式

由于空气在一定速度下运动时,作用在平面和曲面上的理论风压力是空气的动能函数,因此可用数学关系式表示如下:

$$p_0 \propto \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{g} \cdot v^2 \quad (2.2)$$

设承受风压的结构物投影面积为 A ,则可将总风力 F 表示为:

$$F = K K_z p_0 A \quad (2.3)$$

$$p_0 = \alpha v_t^2 \quad (2.4)$$

式中 F ——风载荷, N;
 g ——重力加速度;
 K ——风载荷形状系数,对梁及建筑物侧壁取1.5,对圆柱体侧壁取0.5,对平台总投影面积取1.0;
 v ——风速, m/s;
 K_z ——海上风压高度变化系数,按规范取1.0;
 W ——水的密度, kg/m³;
 A ——受风面积, m²;
 p_0 ——基本风压, Pa;
 α ——风压系数,取0.613N·s²/m⁴;
 v_t ——设计风速, m/s。

2.2 海流载荷

2.2.1 海流分类

海流载荷分为潮汐载荷、海流载荷，它们是作用于海上结构物的主要载荷形式，对深海洋结构物的稳定性有着重大的影响，其情况很复杂，对于深海条件下常常伴有对流等情况发生。然而，潮汐不会发生，所以在本书中不予考虑。

海水水平或竖直地从某一海区流向另一海区的大规模质量转移称为海流，按照其成因可以分为以下几类：

(1) 风海流：由于风在海平面吹过，对海面产生切应力，使海水产生运动，称为风海流。

(2) 梯度流：梯度流是等压面发生倾斜时，水平压强梯度力和地转偏向力达到平衡时的稳定海流。

(3) 潮流：潮流是潮汐中水质点的运动，亦即在水平引潮力作用和潮汐涨落同时发生的海水在水平方向上的周期性流动。

(4) 波浪流：在近岸海区由于波浪引起的海水流动称为波浪流。

(5) 入海径流：由于融冰或大量降雨等原因而显著增加的河川径流，入海后继续向河口方向或沿海区延伸而形成的海流。

(6) 定常流：周期性流和短期流。按照海流随时间变化而划分，则可分为定常流、周期流和短期流。定常流是指基本上不随时间变化的海流，理论上讲，其速度、方向及强度不随时间的变化。周期流是指在一定时间范围重复出现的具有周期变化规律的海流，如季风流，潮流等。短期流是指由于短暂的外界条件变化而引起的偶然性的海流，如气旋通过时产生的风海流和气压梯度流等。

(7) 暖流和寒流：温度较周围水为高，向周围传送或传播热能的海流称为暖流；反之，称为寒流。

(8) 盐水流和淡水流：盐度较周围水高的海流称为盐水流；反之，称为淡水流。

(9) 补偿流：海水流动的结果导致某些海水匮乏，另一海区海水集聚，于是根据水的不可压缩性和连续性，海水必定从集聚的海域流向匮乏的海域，这种海水的补偿成为海水的补偿流。

2.2.2 海流力计算

由于海流可近似看做一种稳定的平面流动，因此海流与圆柱形结构物的相互作用可用平面流与铅直圆柱载荷公式来表示。

(1) 单位长度上的海流力可用下式来表示：

$$f_c = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_w D v_{cmax}^2 \quad (2.5)$$

式中 f_c ——圆柱形桩单位长度上的海流载荷；

C_D ——阻力系数；

v_{\max} ——海流的最大可能速度；

ρ_w ——海水的密度， kg/m^3 ；

D ——圆柱形桩直径。

(2) 管柱上的总海流力。海流力是作用在海洋石油结构物上的一种流动阻力，这种阻力是由于运动的水所产生的定长流动阻力，根据水下结构物上的阻力是流体的动能函数的原理，按照稳定流动条件下的阻力的数学表达方法，可以写出海流力 F_c 为：

$$F_c = \frac{W}{2g} D \int_0^S C_D u^2 dz \quad (2.6)$$

式中 F_c ——海流力作用在圆柱形上的总力；

W ——水的密度， kg/m^3 ；

g ——重力加速度， 9.8m/s^2 ；

D ——圆柱桩的直径， m ；

S ——水面自海底以上的高度， m ；

C_D ——阻力系数，无因次；

u ——海流速度， m/s ；

dz ——垂直方向的长度增量， m 。

(3) 海流速度随深度变化值的计算。为了计算海洋结构物水下部分所承受海流力的大小，需要知道海流流速随水深变化的规律。在无实测资料的情况下，对海平面以下某深度的海流速度，可采用美国船舶检验局使用的公式计算：

$$v_{ch} = v_m \left(\frac{h}{H} \right) + v_T \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.7)$$

式中 v_{ch} ——距海底 h 处的海流速度；

v_m ——海面的风流速度；

v_T ——海面的潮流速度；

H ——水深；

h ——计算深度距海底的高度。

(4) 阻力系数的合理确定。在计算海洋环境载荷时，要遇到确定阻力系数及惯性力系数的问题，而这两个系数的大小又直接关系到作用力的大小，因此必须合理确定。阻力系数 C_D 取决于下列一些因素：

① 雷诺数。由流体力学知道，雷诺数 Re 应为：

$$Re = \frac{vD}{\gamma} \quad (2.8)$$

式中 γ 为海水的运动黏度，一般取 $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。当海流速度 v 数值不同时，计算出的雷诺数也不同，所对应的阻力系数也不同，由式 (2.8) 计算所得的雷诺数，可从表 2.1 查得阻力系数 C_D 的值。

表 2.1 雷诺数与阻力系数的对应关系

区 间	雷诺数 Re	阻力系数 C_D
亚临界区	$Re < 2 \times 10^5$	≈ 1.2
临界区	$2 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$	≈ 0.3
超临界区	$5 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^6$	$0.6 \sim 0.7$
极临界区	$Re > 5 \times 10^6$	$0.6 \sim 0.7$

②相对粗糙度。相对粗糙度是指桩柱上不规则粗糙面沿径向的厚度与桩柱直径的比值，即 K/D 。一般海上结构的相对粗糙度在 $0.001 \sim 0.1$ 范围内。表面粗糙度增大了桩柱的直径，也使海流力增大，故考虑粗糙度这个因素的影响时，必须考虑它对阻力系数的影响，又要考虑它对桩柱直径的影响。一般当相对粗糙度使阻力系数增加 100% 时，它使直径 D 大约增加 20%。

2.3 波浪力

2.3.1 波浪力分类

波浪力是波动的海水作用于物体上的力，一般可以分为五个主要的力，即：

- (1) 阻力：它是和稳定流动条件下的阻力相类似的力，仍是流体动能的函数。
- (2) 惯性力：它是水下结构物排出的流体的质量与流体的质点的加速度的乘积的函数。
- (3) 撞击力：它是物体撞击所产生的力，当波峰穿过空气打击在结构物上，发生冲击或波浪破碎时引起的突然冲击的载荷，这时由于空气被波浪所包围，不断压缩常使之爆炸，发出轰鸣声，撞击力一般可按总阻力在波峰部的惯性力的几分之几来计算，有时采用五分之一。
- (4) 压差力：这种力是由于海水通过沉没水中物体的压力差所造成的，当有沉没于水中的物体时，还是很重要的一种力，经验表明：压差力等于静压差的一半与投影面积的乘积。
- (5) 动量反射力：当波浪作用在沉没于水中的大型物体时，将出现一个反动量，这一能量反射将在大型结构上作用一个相当的力，即称为动量反射力，一般对于高度相当大的大型沉没物必须要考虑此力。

2.3.2 波浪力计算

2.3.2.1 波浪力计算方法概述

作用在海洋结构物上的波浪力的计算是结构设计中最基本的任务，同时也是最困难的任务之一，所以一直以来都是海洋工程领域研究的重点。确定作用于海洋工程结构物上的波浪载荷，可以采用两种不同的方法。设计波法与随机分析方法。

(1) 设计波法。

这是一种确定性方法,即用一个给定的周期和波高的波浪代表一定环境条件下出现的最大波。再根据一种恰当的波浪理论来描述波浪的响应特征,如波浪的剖面、水质点的速度和加速度等,利用一般流体力学的方法计算波浪力。设计波法是根据理想化的规则波来计算波浪力,它虽不能完全反映不规则波对海洋结构物的作用,但计算方法简便,使用方便,使用面广,常为海洋工程设计采用,也是海上平台规范中规定的波浪力的计算方法之一。

(2) 随机分析方法或概率方法。

这种方法是建立在海况的统计特征上的,它将实际海面上不规则的波浪认为是由许多具有随机相位的简单波叠加而成,各个简单波动的能量在相应的波频上的分布就构成一个海浪谱。用此方法可以在某一置信度内得到结构的最大应力、位移等特征响应结果。在对海洋结构物结构进行经济评价及寿命分析时常采用此种方法。

2.3.2.2 不同尺度结构物的波浪力计算

波浪力计算中常根据结构物的尺度与波长的比值分成小尺度波浪力计算和大尺度波浪力计算。当比值 $D/L \leq 0.2$ 时,称为小尺度物体(其中 D 是物体的特征长度,对于圆柱体 D 为直径, L 是波长);当 $D/L > 0.2$ 时,称为大尺度物体,它必须考虑物体的自由表面效应和相对尺度效应,被合起来称为绕射效应。

(1) 当 $D/L > 0.2$ 时的波浪力计算。

目前采用两种方法进行分析。第一种方法,考虑绕射效应的理论分析,即绕射理论。它由马哥卡姆(Mac Camay)和富克(Fucks)等在1954年提出。认为结构的存在将改变结构附近的波浪场。第二种方法,采用弗汝德-克雷洛夫(Froude-Krylov)假定,利用入射波压力在结构表面受压面积上积分计算波浪力。

(2) 当 $D/L \leq 0.2$ 时的波浪力计算。

对于相对尺度较小的细长柱体的波浪力计算,在工程设计中仍广泛采用著名的 Morison 方程,如下式:

$$f_{wy} = \frac{1}{2} C_D \rho_w D \left(u - \frac{\partial y}{\partial t} \right) \left(u - \frac{\partial y}{\partial t} \right) + C_M \cdot \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right) \quad (2.9)$$

式中 f_{wy} ——垂直作用于管柱上的单位长度的波浪力, kN/m;

ρ_w ——海水的密度, kg/m³;

D ——管柱直径, m;

u ——管柱轴线处水质点的水平方向速度, m/s;

C_D ——阻力系数;

C_M ——惯性力系数。

式(2.9)是 Morison 等人于1950年在模型试验的基础上经过大量计算提出的计算垂直于海底的刚性柱体上的波浪载荷公式。该理论假定柱体的存在对波浪运动无显著影响,认为波浪对柱体的作用主要是黏滞效应和附加质量效应。此公式主要把作用在垂直柱体上的力分成两项:一项是与流体加速度成正比的惯性力项,一项是与流体速度平方成正比的曳力项。

若用 Morison 方程计算相应的波浪力, 关键在于选定一种适宜的波浪理论和相应的拖曳力系数和惯性力系数。要得到公式中流体质点的速度和加速度等量可采用不同的波浪理论。目前主要有线性理论和非线性理论, 线性波浪理论 (Airy 波) 是假定波浪振幅足够小, 这样就可以基本忽略非线性项而得到速度势的近似解。非线性波浪理论主要有 Stokes 波理论、椭圆余弦波理论、驻波理论、流函数波理论等。

现有的波浪力计算大多是采用线性波理论, 其形式比较简单, 使用方便。但线性波理论有其局限性, 它只是在假设波幅足够小条件下的非线性波浪运动问题的近似解, 特别是在考虑海洋结构物的生存条件时, 线性波浪理论常不适用。由于 Stokes 波浪理论它可更准确地描述实际波浪的运动。目前对 Stokes 波浪理论的研究逐渐受到重视, 有些国家的海洋平台入级规范也建议用 Stokes 三阶波理论或 Stokes 五阶波理论进行海洋结构物有关强度校核和结构设计。对于隔水管这种小尺寸构件采用 Stokes 波浪理论计算还是很合理的。

在运用计算 Morison 方程求解波浪力的另一个关键问题是如何针对具体问题确定阻力系数 C_D 和惯性力系数 C_M 。多年来, 大量研究表明, 系数 C_D 、 C_M 与雷诺数 Re 、 $K-C$ 数及表面粗糙度有关。因为水质点的速度和加速度与所选的波浪理论有关, 所以选用的系数应与所选用的波浪理论一致。对于一般形状的结构物, 为确定 C_D 、 C_M 必须进行广泛的试验和分析。为了使用方便, 各国船级社和有关部门对 C_D 、 C_M 值的选取范围做出了建议, 见表 2.2。

表 2.2 阻力系数、惯性力系数

实验单位	C_D	C_M	备 注
壳牌公司 I	0.4, 0.5	1.2	波高大于 5m
壳牌公司 II	0.88	1.184 ~ 2.470	波高大于 3m
壳牌公司	0.578	平均取 1.628	波高大于 8m

2.4 海冰载荷

2.4.1 海冰载荷的研究方法

我国海岸线长, 有的地区如北部海域每年最低温度有时达到 -18.3°C , 在每年的 12 月至次年 3 月间常发生冰冻现象。因此在进行海洋石油结构物计算时还要考虑冰压力的作用。

2.4.1.1 研究方法

目前对冰载荷的研究方法可以分为试验和理论分析两种方法。

(1) 理论分析方法。

理论分析方法主要有理论模型和有限元数值模拟方法。理论模型是基于力学原理对海冰材料、海冰与结构作用方式进行简化, 得到可以求解的力学模型, 运用数学方法求解海冰力。如果假设合理, 模型建立适当, 理论模型分析可以揭示物理过程的内在规律, 具有重要意义。但由于自然界中海冰材料物理力学行为的复杂性, 海冰与结构接触过程和边界

条件的复杂性,建立合适的理论模型并求解具有很大的难度。

有限元数值模拟方法是海冰与结构的作用简化为有限元模型,用现有商业软件或者自行编制有限元程序对模型进行数值求解。其优点是可以处理较复杂的力学模型,对一些无法用解析法求解得到的模型可以得到数值解。但是目前这一方法在冰载荷分析中运用得还不够多。有限元理论发展相当成熟,有很多手段可以用于处理这一问题,这方面还有很多工作有待开展。

(2) 试验方法。

试验方法包括原型结构上开展的现场测量和室内试验。现场测量即在原型结构上安装测量海冰力的压力盒,直接测量海冰作用在真实结构上的海冰力。理论上,这种方法得到的海冰力数据真实可靠,是对海冰力的最好估计。但是,由于现场环境条件恶劣,设计合适的压力传感器有很大难度。而且现场的冰况不可控制,结构形式固定,不能得到完备的数据,因而难以得到具有一般性的海冰力计算方法。尽管如此,由于现场测量可以得到各海域真实的冰载荷情况,因此现场数据是研究冰载荷的最重要的资料。工程界对现场试验得到的结论十分重视,在各个设计标准中,基本都采用了现场试验得到的结论。目前国际上在原型结构上冰力测量进行得并不是很多。出于商业考虑,有些测试结果至今仍然处于保密阶段。

另一种试验方法是室内试验,即在实验室用模型冰与结构模型模拟现场情况,进行海冰载荷测量。这种方法的好处是可以灵活改变并准确记录冰厚度、速度、强度及结构形式等试验参数,定量研究各参数对冰载荷的影响情况,建立半理论半经验公式。但由于模型冰很难模拟自然界冰的复杂特性,且实验室试验尺度有限,试验中冰厚度、结构尺度远小于现场的真实情况,难以保证边界条件、海冰与结构作用过程、冰物理力学性质与现场情况的相似性,试验结果的应用有较大的局限性。

2.4.1.2 破坏类型

海冰对结构物作用模式呈现复杂的多样化,当运动的冰排受到结构物的阻碍时,对结构物产生的作用力会随着冰排的运动而逐渐增大,当增大到一定程度时,冰排自身发生破坏,它对结构物的作用力也达到极值,海冰力的这种变化过程受控于冰排的破坏类型,所以冰排自身的破坏类型和过程直接决定着它对结构物的作用模式、过程和作用力的大小。通常情况下,移动的冰排在撞击结构物时可能产生的破坏类型有:

- (1) 挤压破坏:冰排在与结构物的接触面因受到挤压而逐块连续破碎。
- (2) 屈曲破坏:冰排由于受压而失稳,首先在结构物前隆起,然后破坏。
- (3) 纵向剪切破坏:冰排与结构物相互作用,当冰排的剪应力达到强度极限时,产生与运动方向平行的裂缝,造成冰排的破坏,这种破坏模式经常发生在薄冰中。
- (4) 弯曲破坏:冰排沿斜面结构上爬后,形成受弯的梁或板最终因弯曲而破坏。
- (5) 摩擦破坏:指冰排与结构物摩擦时,在接触面上冰排发生的磨损。
- (6) 混合型破坏:指冰排同时具有上述两种或两种以上的破坏类型,最常见的是挤压和屈曲同时存在的破坏,各种破坏类型所占比例因条件而异。

2.4.1.3 冰的模拟实验

海冰与结构物相互作用研究的主要任务是通过对冰与结构物相互作用力学机制的分析,给出对结构物作用的有效载荷,为有冰海区的结构设计提供可靠的科学依据。但是由于现

场条件的恶劣以及现象出现的偶然性、不可重复性和不可控制性,为获得可靠和理想的数据以及规律性的研究成果造成了一定的困难。针对现场试验与观测的弊端,室内冰力的物理模拟试验已经成为重大工程设计中研究冰与结构相互作用机理并校核工程设计参数的重要手段之一。

(1) 进行冰的模拟实验的主要目的是:

①研究冰排的破坏类型,寻求冰排各种破坏类型出现的条件,并由此对现场冰排破坏类型进行预测,探索改变冰排破坏类型的途径。

②了解冰排的破坏机制,从宏观和微观上观察冰排破坏的发生、发展过程,裂缝的出现、分布、方向、密度以及变化规律等,从而研究海冰静力作用的机制。

③确定海冰作用力,探讨各种因素对冰力的影响规律;建立并验证冰力计算方法;预测冰力值的大小,以对工程实际进行指导。

(2) 按性质划分,冰的模拟实验可分为两大类:

①研究冰运动规律的实验,例如,研究港池内外冰的漂流和运移,河道解冻后冰棱的破碎、漂移与堵塞等;

②研究冰对水中结构物作用力的实验,例如,研究冰对海上平台、灯塔、码头、护岸、墩柱的挤压、撞击、上拔、下压以及对破冰船的阻力等。

2.4.2 海冰力计算

海洋结构物与海冰的相互作用及冰载荷研究关心的问题主要是作用在结构上的最大静冰力、动冰力形式以及海冰引起结构振动的机理。综合分析目前国际国内有关冰与直立结构挤压破坏的极值静冰力(F)计算模型,在公式构成的形式上可分为两大类。

(1) 第一类公式形式为:

$$F = \alpha D h \sigma_c \quad (2.10)$$

式中 D ——挤压面宽度;

h ——冰厚;

σ_c ——冰单轴抗压强度;

α ——影响冰力的各项因素的修正系数,它可能代表一个综合修正系数,也可能代表 n 个分项修正系数。

这一类公式是基于极限冰压力理论的公式,为线性形式,量纲明确。极限冰压力理论认为作用在结构上的冰压力不能大于使冰破坏的力,冰对结构作用力的最大值出现在冰破碎前的一瞬间,基于这一理论,冰的极限抗压强度和冰与结构物的挤压面积是冰压力的决定因素,然后再考虑其他次要因素作用,它们都包含在系数 α 中。这一类型的冰力计算模型主要有以下 7 种。

① Korzhavin 公式:

$$F = I \left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{1}{3}} m K D h \sigma_c \quad (2.11)$$

式中 I ——局部挤压系数,当冰厚大于挤压面宽度 15 倍时,取 $I=2.5$;

v ——参考冰速,取 $v_0=1.0\text{m/s}$;

m ——结构形状系数;

K ——接触条件系数, 对圆柱, 取 $0.4 \sim 0.7$, 高冰速时取最小值。

当不考虑冰速(或应变速率)对冰强度的影响, 只计算冰强度的峰值时, 式(2.11)变为:

$$F = mIKDh\sigma_c \quad (2.12)$$

②美国 APIRP2N 公式:

$$F = IKDh\sigma_c \quad (2.13)$$

式中 I ——向系数, 实为局部挤压系数, 但也包括结构形状的影响;

K ——接触系数, 也包括形状的影响。

③美国 API2A 公式:

$$F = CDh\sigma_c \quad (2.14)$$

式中 C ——综合影响系数, 取决于结构形状, 冰速等, 取 $0.3 \sim 0.7$;

σ_c ——冰的单轴抗压强度。

④加拿大标准协会 CSA 公式:

$$F = Dh p_c \quad (2.15)$$

式中 p_c ——冰力的有效值, 取 $0.689 \sim 2.26\text{MPa}$ 。

⑤加拿大灯塔规范公式:

$$F = m'Dh\sigma_c \quad (2.16)$$

式中 m' ——考虑形状, 接触条件的综合因素, 取 $0.4 \sim 0.7$;

σ_c ——冰的单轴抗压强度, 取 $1.38 \sim 1.72\text{MPa}$ 。

⑥ Afanasev 公式:

$$F = mIDh\sigma_c \quad (2.17)$$

其中,

$$\text{当 } 1 < \frac{D}{h} \leq 6 \text{ 时, } I = \sqrt{1 + 5 \frac{h}{D}}$$

$$\text{当 } \frac{D}{h} = 1 \text{ 时, } I = 2.5$$

$$\text{当 } 0.1 < \frac{D}{h} < 1.0 \text{ 时, } I = 4.17 - 1.67 \frac{D}{h}$$

$$\text{当 } \frac{D}{h} = 0.1 \text{ 时, } I = 4.0$$

⑦中国固定平台计算公式:

$$F = mIKDh\sigma_c \quad (2.18)$$

式中 I ——局部挤压系数, 取 2.5 ;

m ——形状系数, 圆柱取 0.9;

K ——接触条件系数, 取 0.45。

(2) 第二类公式形式为: $F = \beta D^{0.5} h' \beta \sigma_c$, 其中 β 为修正系数。

这类公式是由现场观测或试验得到的经验公式, 为非线性形式, 经验公式虽然也认为冰压力是由多种因素确定, 不过它是根据大量的数据拟合出各个指数项, 对于特定的情况能得到很好的结果, 适用性较窄。这类公式主要有以下两种。

①德国 Schwatz 公式: 1976 年 Schwarz 根据在河流桥墩 60cm 直立柱上的现场测试及在美国 IOWA 的模型试验值, 提出了冰温 0℃ 时冰力公式为:

$$F = 3.57 D^{0.5} h^{1.1} \sigma_c \quad (2.19)$$

式中, D, h 的单位为 cm; σ_c 的单位为 kN/cm^2 。

1991 年, 根据渤海辽东湾冰力现场测量结果, Schwarz 又提出了一个适合于渤海的冰力计算公式:

$$F = 30.5 D^{0.5} h^{1.1} \sigma_c \quad (2.20)$$

②日本 Hamayama 公式:

$$F = C D^{0.5} h \sigma_c \quad (2.21)$$

式中 C ——系数, 对圆形截面取 5.0, 对矩形截面取 6.8。

第一类公式的特点是量纲协调, 物理概念明确, 而第二类公式的特点是量纲不协调, 主要原因是由试验或实测数据拟合而成。这类公式通用性较差, 离开试验或实测条件, 公式难以适用。

2.5 地震作用

2.5.1 地震作用理论

2.5.1.1 静力理论

1900 年, 日本大森房吉教授提出了静力理论。静力理论不考虑结构物的动力特性。假设结构物为绝对刚性, 地震时结构物的运动与地面运动完全一致, 结构物的最大加速度等于地面运动的最大加速度。结构物所受的最大地震载荷 F 等于其质量 m 与地面最大加速度的乘积, 即:

$$F = m a_{\max} \quad (2.22)$$

由于这种方法比较简单, 且用这种方法设计的建筑物大多经受了一般地震的考验, 所以, 它稍作修改后至今仍被某些国家的地震设计规范所采用。但是这种方法完全忽略了结构本身动力特性的影响。因为只有当结构的基本固有周期比地面运动周期小得多时, 结构在地震时才有可能不产生变形而被视为刚体。所以静力理论只适用于低矮的、刚性较大的建筑, 如路基、挡土墙和重力式桥台等。

2.5.1.2 反应谱理论

美国学者在 20 世纪 40 年代提出了计算地震力的反应谱理论, 也称动力法。它考虑

了地震时地面的运动特性与结构物自身的动力特性,是当前工程设计应用最为广泛的抗震设计方法。反应谱理论是以单质点体系在实际地震作用下的反应为基础来分析结构反应的方法。

质量为 m 的单质点体系在水平方向地面运动分量作用下质点绝对加速度为 $a(t)$,则质点所受的水平地震作用为:

$$F(t) = ma(t) \quad (2.23)$$

式 (2.23) 表示在地震过程中,质点水平地震作用的大小与方向随时间 t 变化。抗震设计中通常只需要作用的最大值,其值可表示为:

$$F(t) = ma_{\max} = (W/g)a_{\max} = \alpha W \quad (2.24)$$

式中 W ——质点重量, $W=mg$;

g ——重力加速度;

α ——水平地震影响系数, $\alpha = a_{\max}/g$ 。

我国学者根据国内外数百条地震记录的反应谱进行统计分析后,建立了地震响应系数 α 与结构体系自振周期 T 的关系曲线 $\alpha(T)$,如图 2.1 所示。

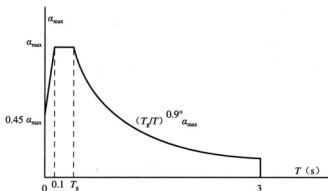


图 2.1 水平地震影响系数

其中 α_{\max} 以及 T_g 的选取如表 2.3 所示。

表 2.3 α_{\max} 以及 T_g 的选取

T_g 取值				
场地	I	II	III	IV
近震	0.2	0.3	0.4	0.65
远震	0.25	0.45	0.55	0.85
截面抗震验算 α_{\max} 值				
烈度	7	8	9	
α_{\max}	0.08	0.16	0.32	

表 2.3 中场地的类型分为坚硬场地土 (I)、中硬场地土 (II)、中软场地土 (III) 及软弱场地土 (IV) 四种, 结构物场地确定方法可参考抗震方面的资料。一般认为竖向地震影响系数 $\alpha_v(T)$ 的曲线形状与水平地震影响系数大体相同, 可直接使用 $\alpha(T)$ 曲线, 数值上一般取 $\alpha_v = (1/2 \sim 3/2)\alpha$, 竖向地震作用可由下式计算:

$$F = \alpha_v W \quad (2.25)$$

2.5.1.3 直接动力分析理论

尽管反应谱分析方法在结构抗震计算中得到广泛应用, 但在分析多质点体系时, 反应谱仅能给出结构各振型反应的最大值, 而丢失了与最大值和振型组合有关的重要信息, 使得难以正确进行各振型最大值的组合。另外, 在分析大跨度柔性结构时, 由于非线性因素的影响, 反应谱方法的计算误差较大。

随着电子计算机在工程中的广泛应用, 将实际地震的加速度时程记录输入结构计算模型, 直接分析结构的地震反应已成为可能, 可直接获得地震过程中结构节点各时刻的位移、速度和加速度, 从而计算各时刻竖向地震作用和构件的地震内力。这种方法也称为时程分析法。

2.5.2 ANSYS 地震分析方法

2.5.2.1 谱分析技术

谱分析是一种将模态分析结果与一个已知的谱联系起来, 然后计算模型的位移和应力的分析技术。主要用于确定结构在随机载荷或随时间变化载荷作用下的动力响应, 如地震、风载等。ANSYS 的谱分析主要有: 单点响应谱分析 (SPRS)、多点响应谱分析 (MPRS)、动力设计分析 (DDAM)、功率谱密度分析 (PSD)。

谱分析必须要已知结构的振型和固有频率, 因此需先进行模态分析。在扩展模态时, 只需扩展到对最后进行谱分析有影响的模态即可。

2.5.2.2 瞬态动力学分析

瞬态动力学分析, 也称时间历程分析, 可以用来分析结构在承受任意的、随时间变化的载荷作用时的动力响应。瞬态分析必须指定系统的杨氏模量、密度等。瞬态分析有三种方法: FULL 法、Reduced 法、Mode Superposition 法。对于结构的地震载荷作用, 首先根据结构物所在的地质条件查找相关的地震加速度数据, 然后进行瞬态动力学分析。

2.6 本章小结

本章主要对海洋环境载荷的一些基本理论进行了简要的介绍, 对海风、海流、波浪、海冰以及地震等载荷对海洋结构物作用力的计算方法进行了详细的叙述。关于海洋环境载荷理论的研究一直以来都是比较复杂的问题, 本章所介绍的各种计算方法应用起来较为简单, 也是被广泛采用的方法。对于这些环境载荷在 ANSYS 结构分析中是如何实现的, 在后继章节中会做更详细的叙述。通过本章的介绍希望读者能够对海洋环境载荷有一个基本的了解和掌握。

3 ANSYS 结构有限元分析基础

◇ 本章导读

本章将对常见的应用于海洋石油工程结构物分析的一系列单元类型进行介绍,并对每种单元基本的参数设置及结构分析中所要注意的问题进行叙述。另外将对本书中工程实例分析时所涉及的基本分析方法作出介绍。目的在于使读者能够更好地进行后继的工程实例篇结构分析的学习。

本章主要包括以下两个内容:

- 海洋结构物分析常见的 ANSYS 单元类型介绍。
- ANSYS 结构分析基本类型。

3.1 海洋结构物分析常见的 ANSYS 单元类型介绍

在利用 ANSYS 对海洋石油结构物进行结构分析计算时,需要选择 ANSYS 单元库中合适的单元类型来对实际的工程结构物进行模拟。本节将对常用的模拟海洋结构物的单元类型进行详细的介绍,包括单元特性、实常数设置、单元输出及应用方面的知识。主要介绍用于模拟海洋结构物的常见单元类型,具体如表 3.1 所示。

表 3.1 常见单元类型

序号	单元类型	模拟对象
1	PIPE16	泥线以下管体结构或不考虑流体效应的平台管体结构(不能考虑塑性)
2	PIPE20	泥线以下管体结构或不考虑流体效应的平台管体结构(可以考虑塑性)
3	PIPE59	泥线以上考虑波流等流体效应的海洋管体结构
4	BEAM4	平台甲板的梁格结构
5	SHELL43	平台甲板及薄壁圆筒结构
6	MASS21	动力分析时集中质量结构
7	COMBIN39	桩土相互作用关系
8	SOLID45	水泥浆块

3.1.1 PIPE16 单元特性介绍

3.1.1.1 单元几何形状

PIPE16 单元的形状如图 3.1 所示。

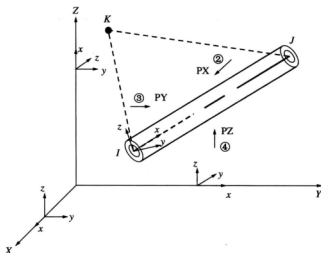


图 3.1 PIPE16 单元形状

PIPE16 单元是一种单轴弹性直管单元，具有拉压、扭转和弯曲功能，此单元由两个节点构成，每个节点具备六个自由度，即沿 X 、 Y 、 Z 轴的位移及转动自由度。

本单元不具备塑性功能，可以用来模拟海洋结构中不考虑流体效应的弹性管体结构，对于考虑流体效应 ANSYS 具有专门的 PIPE59 单元，将在后面详细介绍。

3.1.1.2 单元输入参数

PIPE16 单元的数据输入包括 2 个或 3 个节点，管的外部直径 (OD) 和管壁厚度 (TKWALL)，应力增量系数 (SIF) 与挠曲系数 (FLEX)，内部流体密度 (DENSFL)，外部绝缘层密度 (DENSIN) 与厚度 (TKIN)，允许侵蚀厚度 (TKCORR)，绝缘表面积 (AREAIN)，管壁质量 (MWALL)，管的轴向刚度 (STIFF)，基于转子动力学的自旋频率 (SPIN) 和各向同性材料性质。PIPE16 单元的输入数据如表 3.2 所示。

表 3.2 PIPE16 单元输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	PIPE16
节点	I, J, K (K 节点的正向已选定)
自由度	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
主要实常数	OD (外径), TKWALL (壁厚)
材料参数	EX (弹性模量), PRXY (泊松比), DENS (密度)
面载荷	压力 1—PINT, 2—PX, 3—PY, 4—PZ, 5—POUT
体载荷	温度: T
特殊性质	应力硬化, 大变形, 单元生死

续表

输入项目	变量名称
KEYOPT (1)	0—用温度描述的沿壁厚方向的梯度; 1—用温度描述的直径梯度
KEYOPT (2)	应力增强系数设置项 0—从 SIFI 到 SIFJ 的应力强度系数 1—“T”形连接计算中 I 节点的应力强度系数 2—“T”形连接计算中 J 节点的应力强度系数 3—“T”形连接计算中两端节点的应力强度系数
KEYOPT (4)	单元种类 0—直管 1—阀型管 2—变径管 3—法兰管 4—膨胀连接 5—斜接弯曲 6—“T”形分支
KEYOPT (5)	用 PX, PY 与 PZ 代表横向压力 0—只有法线分布的载荷 1—使用满布载荷 (法线与剪切方向组成)
KEYOPT (6)	0—不打印输出结构单元的力或力矩 2—打印结构单元在该单元的坐标系中的力或力矩
KEYOPT (7)	0—无阻尼的回转矩阵 1—计算回转的阻尼矩阵

3.1.1.3 单元应力输出定义

PIPE16 单元应力输出定义如图 3.2 所示, 如果要采用单元表定义 PIPE16 单元的结果项, 其所有的单元输出定义项见表 3.3。

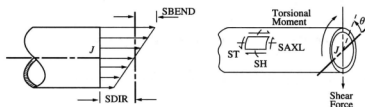


图 3.2 PIPE16 单元应力输出定义示意图

表 3.3 PIPE16 单元输出定义

名 称	定 义
SDIR	轴向应力
SBEND	外表面的最大弯曲应力
ST	由扭转引起的外表面剪应力
SSF	由剪切力引起的剪应力
S (1MX,3MN,INTMX,EQVMX)	最大主应力, 最小主应力, 最大应力集度, 最大等效应力

续表

名 称	定 义
S (AXL, RAD, H, XH)	轴向, 径向, 环向和剪切应力
S (1, 3, INT, EQV)	第一主应力, 第三主应力, 应力集度, 等效应力
EPEL (AXL, RAD, H, XH)	轴向, 径向, 环向与剪切应变
EPHT (AXL, RAD, H)	轴向, 径向与环向热应变
MPOR (X, Y, Z)	节点 <i>I</i> 与节点 <i>J</i> 上力的组成 (在单元坐标系中)
MMOM (X, Y, Z)	节点 <i>I</i> 与节点 <i>J</i> 上力矩的组成 (在单元坐标系中)

如果要通过 **【ETABLE】** 单元表命令定义具体的结果项, ANSYS 帮助系统里有节点 *I* 和节点 *J* 关于各个结果项的输出定义代码, 读者可以自行查看。

3.1.2 PIPE20 单元特性介绍

3.1.2.1 单元几何形状

PIPE20 单元的形状如图 3.3 所示。

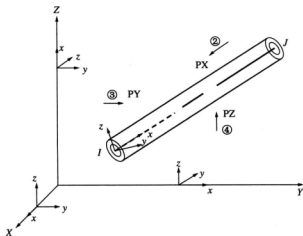


图 3.3 PIPE20 单元形状

PIPE20 单元是一种与 PIPE16 相类似的直管单元, 区别在于 PIPE20 单元具有塑性、蠕变、膨胀等特性, 具有拉压、扭转和弯曲功能, 单元的每个节点具备六个自由度, 即沿 X、Y、Z 轴的位移及转动自由度。

3.1.2.2 单元输入参数

该单元需要输入的数据包括两个节点, 管体外径、壁厚、可选择的应力系数和各向同性材料特性。单元载荷可以由节点和单元载荷表示。压力可由单元表面的面载荷来引入, 如图 3.3 所示, 横向压力可表示风载或拉力载荷 (每个管单位长度), 并在全局笛卡儿坐标系中定义了方向。横向压力正向同坐标正向。此单元不识别渐变压力, 只支持恒压。

温度的影响可以作为作用在单元节点处的单元体载荷来输入。初始温度（节点 I 处 TAVG）默认为 TUNIF。如果此后的所有温度都未指定，则默认使用初始温度。如果节点 I 的温度都被指定，而节点 J 的未指定，则节点 J 的温度默认为与节点 I 的温度相同。对于任何其他形式的温度输入，未指定的都默认为 TUNIF。PIPE20 单元的输入数据如表 3.4 所示。

表 3.4 PIPE20 单元输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	PIPE20
节点	I, J
自由度	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
主要实常数	OD (外径), TKWALL (壁厚) SIFI—应力增量系数 (仅当 KEYOPT (2)=4 时) SIFJ—应力增量系数 (仅当 KEYOPT (2)=4 时)
材料参数	EX (弹性模量), PRXY (泊松比), DENS (密度) 及塑性设置
面载荷	压力 1—PINT (内压), 2—PX (表面载荷), 3—PY (表面载荷), 4—PZ (表面载荷), 5—POUT (外压)
体载荷	温度: T
特殊性质	塑性, 蠕变, 应力刚化, 大变形, 单元生死
KEYOPT (2)	应力强度系数 0—不考虑应力增量系数 4—包括节点 I 和 J 的应力增量系数
KEYOPT (6)	0—不打印输出结构单元的力或力矩 2—打印结构单元在该单元的坐标系中的力或力矩

3.1.2.3 单元应力输出定义

PIPE20 单元应力输出定义如图 3.4 所示，如果要采用单元表定义 PIPE20 单元的结果项，其所有的单元输出定义项与 PIPE16 单元类似。

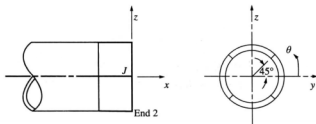


图 3.4 PIPE20 单元应力输出定义示意图

PIPE20 单元的假设与限制：

假设单元有封闭端，因此具有轴向压力效应。此单元的扩展方程是标准的小变形方程，包含剪切变形，所有的计算都基于薄壁原理。假设单元温度沿管长度方向线性变化。如果

输入的应力增量系数小于 1.0 时, 则默认为 1.0。

3.1.3 PIPE59 单元特性介绍

3.1.3.1 单元几何形状

PIPE59 单元的形状如图 3.5 所示。

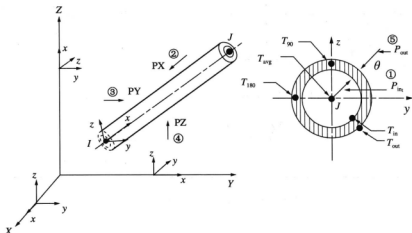


图 3.5 PIPE59 单元几何模型

PIPE59 单元是一种可承受拉、压、弯作用, 并且能够模拟海洋波浪和水流的单轴单元。单元的每个节点有六个自由度, 即沿 x , y , z 方向的线位移及绕 X , Y , Z 轴的角位移。除了本单元的单元力包括水动力和浮力效应, 单元质量包括附连水质量和内部水质量, 可以考虑轴向拉压、扭转、弯曲变形, 其余与单元 PIPE16 相似。该单元还可以模拟缆索单元, 与 LINK8 相似, 这个单元还适合刚度硬化和非线性大应变问题。

3.1.3.2 单元输入定义

PIPE59 单元的横截面是圆管形, 通过指定外径与壁厚确定。该单元支持线性与非线性材料, 同时也支持大位移与大变形, 还支持动力分析, 可进行海洋环境载荷作用下的结构线性、非线性静力与结构线性、非线性动力分析。载荷计算中可以考虑管外壁上的附着层, 在动力计算的附加质量计算中可以计入附连水质量与管内、外附着质量。

如果在待求解的问题中包含 PIPE59 单元, 总体坐标系的原点必须位于海面处, 如图 3.6 所示。而且以垂向轴为 Z 轴, Z 轴的正向指向上。单元可位于海面以上或浸没于海水中, 也可处于半浸没状态。在初始状态, 单元的节点不得进入泥面以下 $0.125D_e$ (D_e 为圆管的外径加上 2 倍的海生物附着层厚度)。对于泥面以下的结构, 可用不计流体效应的 PIPE16 或 PIPE20 单元模拟。单元的实常数定义如表 3.5 所示。

3.1.3.3 流体载荷定义

流体动载荷效应可以是由于结构在静止流体中的运动引起的, 也可以是结构静止而流体运动引起, 或者结构与流体同时运动引起的。流体的运动包括两部分, 即流与波浪引起的流体质点运动。流的水平速度与方向可按沿 z 向的分布 (最多 8 个 z 向位置的值) 输入,

两点之间位置的速度与方向值按线性插值确定。ANSYS 程序中对于波浪的处理给出了四种波浪理论，具体见表 3.6 所示。

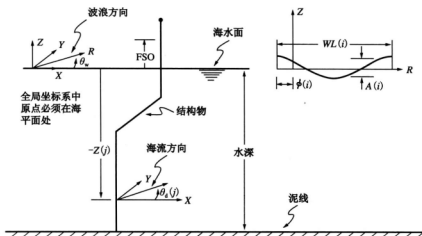


图 3.6 PIPE59 单元使用规则

表 3.5 PIPE59 单元实常数

名 称	描 述
DO	外径 (D_o)
TWALL	壁厚 (默认 $D_o/2.0$)
CD	法向曳力系数 (C_D)
CM	法向惯性系数 (C_M)
DENSO	内部液体密度 (仅用于计算压力效应) (质量 / 长度 ³)
FSO	Z 向管内部液体表面 (仅用于计算压力效应)
CENMPL	内部液体单位长度附加质量 (用于计算质量矩阵)
CI	外部流体附加质量系数
CB	浮力系数
CT	法向曳力系数
ISTR	初应变
DENSIN	外部附着物密度
TKIN	外部附着物厚度
TWISTTEN	翘曲常数

表 3.6 波浪理论选项

波浪理论选项 KWAV	相应的波浪理论
0	深度衰减经验修正的微弱波浪理论
1	Airy 波浪理论
2	Stokes 五阶波浪理论 (推荐用)
3	流函数波浪理论

波浪自由表面由下式定义:

$$\eta_s = \sum_{i=1}^{N_w} \eta_i = \sum_{i=1}^{N_w} \frac{H_i}{2} \cos \beta_i \quad (3.1)$$

$$\beta_i = \begin{cases} 2\pi \left(\frac{R}{\lambda_i} + \frac{t}{\tau_i} + \frac{\varphi_i}{360} \right) & \text{当 KEYOPT}(5) = 0 \text{ 且 } K_w = 0 \text{ 或 } 1 \\ 2\pi \left(\frac{R}{\lambda_i} + \frac{t}{\tau_i} + \frac{\varphi_i}{360} \right) (i) & \text{当 KEYOPT}(5) = 0 \text{ 且 } K_w = 2 \text{ 或 } 3 \\ 0.0 & \text{当 KEYOPT}(5) = 1 \\ \frac{\pi}{2} & \text{当 KEYOPT}(5) = 2 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{当 KEYOPT}(5) = 3 \\ \pi & \text{当 KEYOPT}(5) = 4 \end{cases} \quad (3.2)$$

式中 η_s ——波总的高度;

N_w ——波组成总数目, $N_w = \begin{cases} \text{波数} & \text{if } K_w \neq 2 \\ 5 & \text{if } K_w = 2 \end{cases}$;

K_w ——波浪理论序号 (在 WATER TABLE 中由 KWAVE 定义输入);

η_i ——第 i 组波的波高;

H_i ——表面系数, $H_i = \begin{cases} \text{波数} & \text{if } K_w = 0 \text{ 或 } 1 \\ \text{由其他输入确定} & \text{if } K_w = 2 \end{cases}$;

R ——沿波作用方向自 X-Y 平面原点指向单元某点处的径向距离;

λ_i ——波长, $\lambda_i = \begin{cases} \text{按 WL}(i) \text{ 输入确定} & \text{当 WL}(i) > 0 \text{ 且 } K_w = 0 \text{ 或 } 1 \\ \text{由其他方程确定} & \end{cases}$;

t ——载荷作用时间;

τ_i ——波浪周期, $\tau_i = \begin{cases} \text{按输入的 } \tau(i) \text{ 确定} & \text{当 } K_w \neq 3 \\ \text{按其他输入确定} & \text{当 } K_w = 3 \end{cases}$;

φ_i ——相位角。

根据第 2 章中所讲述的有关波浪理论, 目前被广泛应用的波浪理论是 STOKES 五阶波浪理论。对于海流载荷的处理, 直接在 WATER TABLE 中定义位于不同水深位置的流速及作用方向即可, ANSYS 程序中考虑了不同的波流耦合作用方式, 如图 3.7 所示。

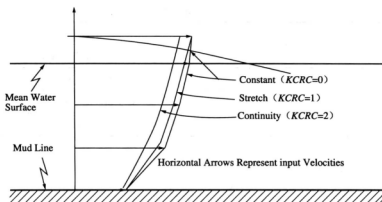


图 3.7 波浪耦合作用方式

上述所有的流体载荷参数定义，除了在实常数里定义的 C_D 、 C_M 之外，需要定义 WATER TABLE 来实现流体载荷的作用，通过 ANSYS 帮助系统查看 PIPE59 单元，可以看到一个 “Water Motion Table”，如表 3.7 所示（选取部分项目）。

表 3.7 环境载荷参数

序 号	名 称					
1 ~ 5	KWAVE	KCRC	DEPTH	DENSW	θ_w	
7 ~ 12	Z(1)	W(1)	$\theta_s(1)$	Z(2)	W(2)	$\theta_s(2)$
13 ~ 18	Z(3)	W(3)	$\theta_s(3)$
...
79 ~ 81	A(1)	$\tau(1)$	$\varphi(1)$

表中：① KWAVE——波浪理论的序号，推荐采用 STOKES 五阶波浪理论，即序号为 “2”；

② KCRC——波浪耦合作用方式序号，取值有以下三个选择，常用的选择 “0” 或 “1”；

0——沿波浪作用方向，水面以下使用当前输入的海流剖面，水面以上使用最高的海流剖面；

1——波峰处海流剖面被拉伸（或压缩）；

2——除了与 KCRC=1 时相同外，还需保证海流剖面水平置中以至于确保海流的总流量与输入的剖面相同，选择 KCRC=2 时，必须保证所有的海流速度方向一致。

③ DEPTH——水深，注意 PIPE59 单元只能用于泥线以上结构的模拟；

④ DENSW——海水密度；

⑤ θ_w ——波浪作用在结构物上的方向夹角，指与 X 轴正向的夹角；

⑥ Z(1)、Z(2)、Z(3) ——分别指海水底部、中部、海平面处的坐标，以海平面处为原点，向上为正方向，即 Z(1) 在数值上等于水深的相反数；

⑦ W(1)、W(2)、W(3) ——分别指海水底部、中部、海平面处的流速；

⑧ $\theta_s(1)$ 、 $\theta_s(2)$ 、 $\theta_s(3)$ ——分别指海水底部、中部、海平面处的流速作用方向夹角，指与 X 轴正向的夹角，如果 KCRC=0 或 1，三个方向可以不同，如果 KCRC=2，则要求海流方向必须一样，海流和波浪的作用方向可以有任意的夹角；

⑨ A(1) ——波高；

⑩ $\tau(1)$ ——波周期；

⑪ $\varphi(1)$ ——相位角。

注意：如果选择 STOKES 五阶波，只需要输入波高、周期及相位角即可。如果进行结构的静力分析，对于相位角的输入必须首先做相位角搜索，以找到波流耦合力最大时的相位角，以此相位角作为静力分析时的参数，具体搜索方法见第 4 章第一个工程实例。

3.1.3.4 单元输出定义

PIPE59 单元的输出定义如图 3.8 所示, 单元表定义输出项定义与 PIPE16 大部分相同, 具体可以查看 ANSYS 帮助系统中有关 PIPE59 单元的“Output Data”项。

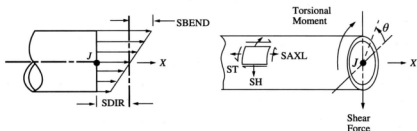


图 3.8 PIPE59 单元输出定义示意图

关于 PIPE59 单元的其他一些详细信息, 建议读者自行查看 ANSYS 帮助系统里的相关介绍, 由于进行海洋石油结构物分析, PIPE59 单元显得很重要, 因此在进行具体的分析之前, 有必要将该单元了解得比较深入一些, 能够为后继的研究分析打下基础。

3.1.4 BEAM4 单元特性介绍

3.1.4.1 单元几何形状

BEAM4 单元的几何形状如图 3.9 所示。

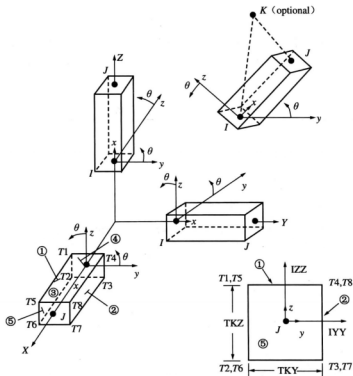


图 3.9 BEAM4 单元几何形状图

BEAM4 单元是一种可用于承受拉、压、弯、扭的单轴受力单元。这种单元在每个节点上有六个自由度： x 、 y 、 z 三个方向的线位移和绕 X 、 Y 、 Z 三个轴的转动自由度。可用于计算应力硬化及大变形的问題。通过一个相容切线刚度矩阵的选项用来考虑大变形（有限旋转）的分析。可以用来模拟海洋平台甲板上的梁格结构。

该单元在使用中的假设与限制：

- (1) 单元的长度及面积不可为 0，当没有大的剪切变形时，其惯性矩可以为 0。
- (2) 对于惯性矩的计算，梁单元的横截面可以是任意形状的。单元高度仅用于弯曲及热应力的计算，在进行应力计算时取截面底端到中性轴的距离为相应的截面高度的一半。
- (3) 温度梯度在高度方向和长度方向一般都被认为是线性的。
- (4) 当使用相容切线刚度矩阵时，一定要注意使用切合实际的（即按比例）的单元实常数。这是因为相容应力刚度矩阵是基于单元应力计算的，如果人为取过大或过小的截面特性，则计算的应力可能不正确，导致相应的应力刚度矩阵也不正确（相容应力刚度矩阵的某些分量或能变成无穷大）。类似的取不合适的实常数带来的问题可能在线性预应力或线性屈曲分析中发生。
- (5) 在回转仪的模式分析中，改变初始位移值对计算结果的影响很大，可能会导致真实或虚构特征值存在潜在的错误。
- (6) 该单元不能采用阻尼材料特性。
- (7) 只允许使用应力强化和大变形这两个非线性特征。

3.1.4.2 单元输入定义

BEAM4 单元的定义通常是以下这些输入参数确定的：两或三个节点变量，横截面积变量，两个轴惯性矩（IZZ 和 IYY）变量，两个厚度变量（TKZ, TKY），绕单元坐标系下 X 轴的转角变量（ θ ），绕 X 轴（单元坐标系下）扭转惯性矩（IXX）及材料属性。具体如表 3.8 所示。

表 3.8 BEAM4 单元的输入数据

输入项目	变量名称
单元名称	BEAM4
节点	I, J, K (可选择的)
自由度	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
实常数	AREA, IZZ, IYY, TKZ, THETA, ISTRN, IXX, SHEARZ, SHEARY, SPIN, ADDMAS
材料参数	EX, ALPX (or CTEx or THSX), DENS, GXY, DAMP
表面载荷	压力 表面 1 ($I-J$) $-Z$ 法线方向 表面 2 ($I-J$) $-Y$ 法线方向 表面 3 ($I-J$) $+X$ 切线方向 表面 4 (I) $+X$ 轴线方向 表面 5 (J) $-X$ 轴线方向 当加载在相反的方向时采用负值
体载荷	温度: $T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8$

续表

输入项目	变量名称
特殊性质	应力强化, 大变形, 单元生死
KEYOPT (2)	应力强化选项 0—当 NLGEOM 打开时, 只采用主要的切向刚度矩阵 1—采用一致的切向刚度矩阵 2—不采用一致的切向刚度矩阵
KEYOPT (6)	膜力和力矩输出控制变量 0—不输出膜力和力矩 1—不输出一致的切向刚度矩阵
KEYOPT (7)	回转阻尼矩阵选项 0—无 1—计算回转阻尼矩阵, 实常数 SPIN 必须大于 0, IYY=IZZ
KEYOPT (9)	控制 I 和 J 点中间的节点输出 N—输出中间的 N 个位置 (N=0,1,3,5,7,9)
KEYOPT (10)	用于 SFBEAM 命令指定的线性表面载荷 0—单位长度载荷的位置按长度偏移量定义 1—单位长度载荷的位置按长度比值 (0.0 ~ 1.0) 偏移量来定义

具体有关实常数的定义如表 3.9 所示。

表 3.9 BEAM4 实常数表

序号	名称	描述
1	AREA	横截面积
2	IZZ	惯性矩
3	IYY	惯性矩
4	TKZ	沿 Z 轴单元厚度
5	TKY	沿 Y 轴单元厚度
6	THETA	绕 X 轴的转角
7	ISTRN	初始应变
8	IXX	扭转惯性矩
9	SHEARZ	剪切变形常数 Z[1]
10	SHEARY	剪切变形常数 Y[2]
11	SPIN	转动频率 (当 KEYOPT(7)=1 时设定)
12	ADDMA	附加质量 / 单位长度

注: ① SHEARZ 与 IZZ 有关联, 如果 SHWARZ=0 则表示忽略单元 Y 方向的剪切变形;

② SHEARY 与 IYY 有关联, 如果 SHWARY=0 则表示忽略单元 Z 方向的剪切变形。

3.1.4.3 单元输出定义

BEAM4 单元的求解结果总体为两部分：节点位移含全部节点解及单元解。以下是对“BEAM4 应力计算结果示意图”的一些说明：如图 3.10 所示，最大应力是指轴向应力与弯曲应力绝对值之和，最小应力是指轴向应力与弯曲应力绝对值之差。

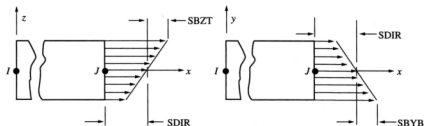


图 3.10 BEAM4 应力计算结果示意图

表 3.10 所示是 BEAM4 单元输出信息表，用命令 ETABLE(POST1) 及 ESOL(POST26) 可定义这些变量用于查询。

表 3.10 单元输出信息表

名 称	定 义
SDIR	轴向正应力
SBYT	梁内单元 +Y 面上的弯曲应力
SBYB	梁内单元 -Y 面上的弯曲应力
SBZT	梁内单元 +Z 面上的弯曲应力
SBZB	梁内单元 -Z 面上的弯曲应力
SMAX	最大应力（正应力 + 弯曲应力）
SMIN	最小应力（正应力 - 弯曲应力）
EPELDIR	端部轴向弹性应变
EPELBYT	梁内单元 +Y 面上的弯曲弹性应变
EPELBYB	梁内单元 -Y 面上的弯曲弹性应变
EPELBZT	梁内单元 +Z 面上的弯曲弹性应变
EPELBZB	梁内单元 -Z 面上的弯曲弹性应变
EPTHDIR	端部轴向热应变
EPTHBYT	梁内单元 +Y 面上的弯曲热应变
EPTHBYB	梁内单元 -Y 面上的弯曲热应变
EPTHBZT	梁内单元 +Z 面上的弯曲热应变
EPTHBZB	梁内单元 -Z 面上的弯曲热应变
EPINAXL	单元初始轴向应变
MFOR (X, Y, Z)	单元坐标系中 X, Y, Z 方向的力
MMOM (X, Y, Z)	单元坐标系中 X, Y, Z 方向的弯矩

3.1.5 SHELL43 单元特性介绍

SHELL43 单元适合模拟线性、弯曲及适当厚度的壳体结构。单元中每个节点具有六个自由度：沿 X 、 Y 和 Z 方向的平动自由度以及绕 X 、 Y 和 Z 轴的转动自由度。平面内两个方向的形状变化都是线性的。对于平面外的运动，用张量组的混合内插法。

单元具有塑性、蠕变、应力刚化、大变形和大应变的特性。单元几何模型如图 3.11 所示。

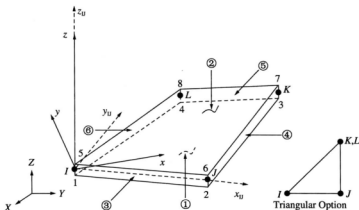


图 3.11 SHELL43 单元几何模型

图 3.11 给出了 SHELL43 单元的几何形状、节点位置和坐标系设置。单元由四个节点、四个壳厚度以及正交各向异性的材料特性确定。正交各向异性材料的方向与单元坐标系的方向一致。单元 X 轴可以从 X 轴向 Y 轴旋转一个角度 THETA 。

单元需要有一个有效的厚度。随着在每个角节点处输入的厚度值不同，假定厚度在单元面积上平滑变化。如果单元厚度不变，只输入 $\text{TK}(1)$ 就可以了。如果厚度不是常数，必须分别输入四个节点的厚度值。

3.1.6 COMBIN39 单元特性介绍

COMBIN39 是一种具有非线性广义力—变形能力的轴向单元，该单元能用于任何分析中，具有在一维、二维或三维应用中纵向拉伸或扭转的能力。纵向选项是一种单轴的拉伸—压缩单元，在每个节点上最多有三个自由度：节点坐标轴 X 、 Y 和 Z 方向上的平移，此单元不考虑弯曲和扭转。扭转选项是一种纯粹的转动单元，在每个节点上有三个自由度：绕节点坐标轴 X 、 Y 和 Z 轴的转动，不考虑弯曲和轴向载荷。单元几何模型如图 3.12 所示。

单元具有大位移的能力，因此每个节点处有两个或三个自由度。用户需要通过输入力—变形的离散点来明确定义 COMBIN39 的力—变形曲线。每条曲线需要定义 20 个这样的离散点，将这些数据作为实常数输入。

图 3.12 是单元的几何图、节点位置和坐标系。单元由两个节点和一条广义的力—变形曲线来定义。这条曲线上的点（如 F_1 、 D_1 ），在结构分析中代表力（弯矩）和与之相对应的位移（或转角）。做轴对称分析时，载荷曲线应定义在全部 360° 的基础上。力—变形曲线

的输入, 应使变形从第三 (压缩) 象限到第一 (拉伸) 象限不断地增长。相邻变形不能小于全部的输入变形范围的 10^{-7} 倍。最后输入的变形值必须为正。应避免趋于竖直的曲线段。如果力—变形曲线被超出了, 最后定义的斜率被保留, 而且其状态仍然保持等于最后这段的编号。如果力—变形曲线的压缩部分被明确地定义了 (没被映射), 则至少应有一个点在原点 $(0, 0)$, 一个点位于第一 (拉伸) 象限。

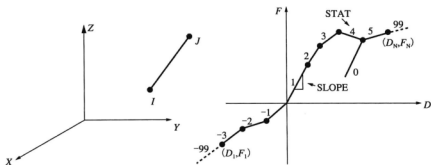


图 3.12 COMBIN39 单元几何模型

3.1.7 SOLID45 单元特性介绍

SOLID45 单元用于构造三维实体结构。单元通过 8 个节点来定义, 每个节点有三个沿着 X 、 Y 和 Z 轴平移的自由度, 单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力。其几何模型如图 3.13 所示。

该单元可定义 8 个节点和正交各向异性材料。正交各向异性材料方向对应于单元坐标方向。单元载荷参见节点和单元载荷部分。压力可以作为表面载荷施加在单元各个表面上, 压力指向单元内部。可以输入温度和流量作为单元节点处的体载荷。

KEYOPT (1) 用于指定包括或不包括附加的位移形函数。KEYOPT (5) 和 KEYOPT (6) 提供不同的单元输出选项。当 KEYOPT (2)=1 时, 该单元也支持用于沙漏控制的均匀缩减 (1 点) 积分。

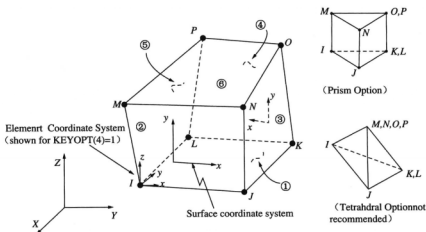


图 3.13 SOLID45 单元几何模型

(1) 均匀缩减积分在进行非线性分析时有如下好处:

① 相对于完全积分选项而言, 单元刚度集成和应力 (应变) 计算需要更少的 CPU 时间, 而仍能获得足够精确的结果。

② 当单元数量相同时, 单元历史存储记录 (.ESAV 和 .OSAV) 的长度约为完全积分 ($2 \times 2 \times 2$) 的 $1/7$ 。

③ 非线性分析的收敛性通常远比采用额外位移形状的完全积分要好; 即, KEYOPT (1)=0, KEYOPT (2)=0。

④ 分析结果不会受 (由塑性或其他不可压缩材料引起的) 体积锁死的影响。

(2) 采用均匀缩减积分也有以下缺点:

① 当采用相同网格进行弹性分析时, 结果显然不如完全积分方法精确。

② 采用单层单元时不能很好地得到结构的弯曲特性 (例如, 一根悬臂梁, 受横向集中力, 采用单层单元) 建议采用 4 层单元。

3.1.8 MASS21 单元特性介绍

MASS21 是一个具有六个自由度的点元素: 即 X 、 Y 和 Z 方向的位移和绕 X 、 Y 和 Z 轴的转动自由度。每个方向可以具有不同的质量和转动惯量。其几何模型如图 3.14 所示。

此质点元素由一个单一的节点来定义, 此元素的坐标系可以平行于全局的笛卡儿坐标系也可以是节点坐标系。作大偏转分析时元素坐标系相对于节点坐标系会产生旋转。可以通过 KEYOPT (3) 选项来禁止转动惯量的产生或使元素退化为二维形式。如果一个元素只需一个输入, 那么这个输入将假定到其他所有方向。

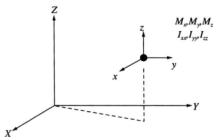


图 3.14 MASS21 单元几何模型

3.2 ANSYS 结构分析基本类型

ANSYS 结构分析中包含了多种分析类型, 本节将重点介绍本书中所涉及的主要分析类型的一些基本过程和参数设置等问题, 包括静力分析 (含弹塑性分析方法)、模态分析及瞬态动力分析等方法。

3.2.1 结构静力分析

3.2.1.1 基本定义

结构静力分析是指在固定不变的载荷作用下求解结构的效应, 它不考虑惯性和阻尼的影响, 如结构受随时间变化载荷的情况。但是, 静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响 (如重力等), 以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷 (如等价静力风载)。

3.2.1.2 静力分析中的载荷

静力分析用于计算由那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位

移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定，即假定载荷和结构的响应随时间的变化非常缓慢。静力分析所施加的载荷包括：

- (1) 外部施加的作用力和压力；
- (2) 稳态的惯性力（如重力和离心力）；
- (3) 位移载荷；
- (4) 温度载荷。

3.2.1.3 静力分析种类

结构静力分析既可以是线性的也可以是非线性的。非线性静力分析包括所有的非线性类型：大变形，塑性，蠕变，应力刚化，接触（间隙）单元，超弹性单元等。对于线性静力分析，在此不做详细叙述，接下来主要介绍结构非线性静力分析。

3.2.1.4 注意的问题

在使用本单元时应该注意以下的问题：

- (1) 单元类型必须指定为线性或非线性的结构单元类型；
- (2) 材料属性可以是线性或非线性、各向同性或正交各向异性、常量或与温度相关的量等，但是用户必须定义弹性模量和泊松比；
- (3) 对于重力一样的惯性载荷，必须要定义能计算出质量的参数，如密度等；
- (4) 对应力、应变感兴趣的区域，网格划分比仅对位移感兴趣的区域要密；
- (5) 如果分析中包含非线性因素，网格划分到能捕捉非线性因素影响的程度。

3.2.1.5 分析步骤

(1) 建模。

这一步对线性和非线性分析都是必需的，尽管非线性分析在这一步中可能包括特殊的单元或非线性材料性质，如果模型中包含大应变效应，应力—应变数据必须依据真实应力和真实（或对数）应变表示。

(2) 加载且得到解。

在这一步中，需要定义分析类型和选项，指定载荷步选项，开始求解。对于非线性求解经常要求多个载荷增量，且总是需要平衡迭代，它不同于线性求解。当进入求解处理器后，按照下列选项进行必要的设置：

①分析类型：选择 Static（静态）。

②变形或大应变选项（GEOM）：并不是所有的非线性分析都将产生大变形，根据分析的需要及所选择单元类型进行设置。

③应力刚化效应（SSTIF）：如果存在应力刚化效应选择 ON。

④牛顿—拉普森选项（NROPT）：仅在非线性分析中使用这个选项。这个选项指定在求解期间每隔多久修改一次正切矩阵，可以指定以下这些值中的一个：

(a) 程序选择（NROPT, ANTO）：程序基于模型中存在的非线性种类选择用这些选项中的一个，在需要时牛顿—拉普森方法将自动激活自适应下降。

(b) 全（NROPT, FNLL）：程序使用完全的牛顿—拉普森处理方法，在这种处理方法中每进行一次平衡迭代修改刚度矩阵一次。如果自适应下降是关闭的，程序每一次平衡迭代都使用正切刚度矩阵（我们一般不建议关闭自适应下降，但是你或许发现这样做可能更

有效)。如果自适应下降是打开的(缺省),只要迭代保持稳定(也就是,只要残余项减小,且没有负主对角线出现),程序将仅使用正切刚度阵。如果在一次迭代中探测到发散倾向,程序抛弃发散的迭代且重新开始求解,应用正切和正割刚度矩阵的加权组合。当迭代回到收敛模式时,程序将重新开始使用正切刚度矩阵。对复杂的非线性问题自适应下降通常将提高程序获得收敛的能力。

(c) 修正的(NROPT, MODI):程序使用修正的牛顿—拉普森方法,在这种方法中正切刚度矩阵在每一步子步中都被修正。在一个子步的平衡迭代期间矩阵不被改变。这个选项不适用于大变形分析。自适应下降是不可用的。

(d) 初始刚度(NROPT, INIT):程序在每一次平衡迭代中都使用初始刚度矩阵这一选项比完全选项似乎较不易发散,但它经常要求更多次的迭代来得到收敛。它不适用于大变形分析。自适应下降是不可用的。

⑤方程求解器:对于非线性分析,使用前面的求解器(缺省选项)。

⑥加载:在大变形分析中惯性力和点载荷将保持恒定的方向,但表面力将“跟随”结构而变。

⑦指定载荷步选项:这些选项可以在任何载荷步中改变。

3.2.1.6 弹塑性结构分析设置

塑性是一种在某类给定载荷下,材料产生永久变形的特性。对大多数工程材料来说,当其应力低于比例极限时,应力—应变关系是线性的。另外,大多数材料在其应力低于屈服点时,表现为弹性行为,也就是说,当移走载荷时,其应变也完全消失。

由于屈服点和比例极限相差很小,因此在 ANSYS 程序中,假定它们相同。在应力—应变的曲线中,低于屈服点的称为弹性部分,超过屈服点的称为塑性部分,也称为应变强化部分。塑性分析中考虑了塑性区域的材料特性。

ANSYS 程序提供了多种塑性材料选项,在此主要介绍四种典型的材料选项,可以通过激活一个数据表来选择这些选项。

经典双线性随动强化: BKIN; 双线性等向强化: BISO; 多线性随动强化: MKIN; 多线性等向强化: MISO。

(1) 经典的双线性随动强化 (BKIN)。

使用一个双线性来表示应力—应变曲线,所以有两个斜率,弹性斜率和塑性斜率,由于随动强化的 Vonmises 屈服准则被使用,所以包含有鲍辛格效应,此选项适用于遵守 Von Mises 屈服准则,初始为各向同性材料的小应变问题,这包括大多数的金属。需要输入的常数是屈服应力和切向斜率,可以定义高达六条不同温度下的曲线。

注意:使用 MP 命令来定义弹性模量;弹性模量也可以是温度相关的;切向斜率 Et 不可以是负数,也不能大于弹性模量。

在使用经典的双线性随动强化时,可以分下面三步来定义材料特性:定义弹性模量;激活双线性随动强化选项;使用数据表来定义非线性特性。

(2) 双线性等向强化 (BISO)。

使用双线性来表示应力—应变曲线,在此选项中,等向强化的 Von Mises 屈服准则被使用,这个选项一般用于初始各向同性材料的大应变问题。需要输入的常数与 BKIN 选项相同。

(3) 多线性随动强化 (MKIN)。

使用多线性来表示应力—应变曲线，模拟随动强化效应，这个选项使用 Von Mises 屈服准则，对使用双线性选项 (BKIN) 不能足够表示应力—应变曲线的小应变分析是有用的。

需要输入的包括最多五个应力—应变数据点（用数据表输入），可以定义五条不同温度下的曲线。在使用多线性随动强化时，可以使用与 BKIN 相同的步骤来定义材料特性，所不同的是在数据表中输入的常数不同。

(4) 多线性等向强化 (MISO)。

使用多线性来表示使用 Von Mises 屈服准则的等向强化的应力—应变曲线，它适用于比例加载的情况和大应变分析。需要输入最多 100 个应力—应变数据点，最多可以定义 20 条不同温度下的曲线。

因此，进行结构的弹塑性分析的基本步骤如下：

- ① 选择合适的单元类型，所选择的单元必须有具备塑性功能；
- ② 设置材料的塑性选项；
- ③ 建立结构有限元模型；
- ④ 设置求解选项，是否打开大变形等设置。

3.2.2 结构模态分析

3.2.2.1 模态分析定义

模态分析是用来确定结构振动特性的一种技术，主要是求解结构的自然频率、振型以及振型参与系数等，它是所有动力学分析类型的最基础的内容，其分析结果可以作为瞬态动力分析、谐响应分析和谱分析等其他动力分析的基础。进行模态分析具有以下目的：

- (1) 使得结构设计避免共振或以特定的频率进行振动；
- (2) 使工程师可以认识到结构对于不同类型的动载荷是如何响应的；
- (3) 有助于在其他动力分析中估算求解控制参数（如时间步长等）。

任何结构或部件都有固有频率和相应的模态振型，这些属于结构或部件自身的固有属性。模态分析实质是计算结构振动特征方程的特征值和特征向量。

3.2.2.2 基本方程

典型的无阻尼结构自由振动的运动方程如下：

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = 0 \quad (3.3)$$

式中 $[M]$ ——质量矩阵；
 $[K]$ ——刚度矩阵；
 $\{\ddot{U}\}$ ——加速度向量；
 $\{U\}$ ——位移向量。

如果令：

$$\{U\} = \{\phi\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.4)$$

则有：

$$\{\ddot{U}\} = -\omega^2 \{\phi\} \sin(\omega t + \varphi)$$

代入运动方程, 可得:

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = \{0\} \quad (3.5)$$

方程 (3.5) 称为结构振动的特征方程, 模态分析就是计算该特征方程的特征值 ω_i , 及特征值向量 $\{\phi_i\}$ 。需要注意的是:

- (1) 模态分析属于线性分析, 在模态分析中只有线性行为是有效的, 任何非线性行为都将被忽略并作为线性处理 (即 $[M]$ 、 $[K]$ 均为常量)。
- (2) 在模态分析中, 材料可以是线性的、各向同性或者正交各向异性的、恒定的或者与温度相关的。分析中必须指定材料的弹性模量和密度。

3.2.2.3 模态提取方式

在 ANSYS 中有以下几种提取模态的方法: Block Lanczos 法、子空间法、缩减法、不对称法、阻尼法。

使用何种模态提取方法主要决定于模型大小 (相对于计算机的计算能力而言) 和具体的应用场合。

(1) Block Lanczos 法: 该方法可以在大多数场合中使用, 是一种功能强大的方法, 当提取中型到大型模型 (50000 ~ 100000 个自由度) 的大量振型时, 这种方法很有效; 经常应用在具有实体单元或壳单元的模型中; 在具有或没有初始截断点时同样有效 (允许提取高于某个给定频率的振型)。可以很好地处理刚体振型; 需要较高的内存。

(2) 子空间法: 比较适合于提取类似中型到大型模型的较少的振型 (< 40), 需要相对较少的内存; 实体单元和壳单元应当具有较好的单元形状, 要对任何关于单元形状的警告信息予以注意; 在具有刚体振型时可能会出现收敛问题; 建议在具有约束方程时不要使用此方法。

(3) 缩减法: 如果模型中的集中质量不会引起局部振动, 例如, 像梁和杆那样, 可以使用缩减法, 它是所有方法中最快的; 需要较少的内存和硬盘空间。使用矩阵缩减法, 即选择一组主自由度来减小 $[K]$ 和 $[M]$ 的大小; 缩减的刚度矩阵 $[K]$ 是精确的, 但缩减的质量矩阵 $[M]$ 是近似的, 近似程度取决于主自由度的数目和位置; 在结构抵抗弯曲能力较弱时不推荐使用此方法, 如细长的梁和薄壳。

(4) 不对称法: 适用于声学问题 (具有结构耦合作用) 和其他类似的具有不对称质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 的问题, 计算以复数表示的特征值和特征向量实数部分就是自然频率虚数部分表示稳定性, 负值表示稳定, 正值表示不确定。

(5) 阻尼法。在模态分析中一般忽略阻尼, 但如果阻尼的效果比较明显, 就要使用阻尼法。主要用于回转体动力学中, 这时陀螺阻尼应是主要的; 在 ANSYS 的 BEAM4 和 PIPE16 单元中, 可以通过定义实常数中的 SPIN (旋转速度, 弧度/秒) 选项来说明陀螺效应; 计算以复数表示的特征值和特征向量。

3.2.2.4 分析步骤

(1) 建立模型: 必须定义密度和弹性模量, 只能使用线性单元和线性材料, 非线性性质将被忽略。

(2) 选择分析类型和分析选项。

(3) 施加边界条件并求解。

(4) 评价结果。

3.2.3 瞬态动力学分析

3.2.3.1 基本定义

瞬态动力学分析又称时间历程分析，用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的动力学响应，目的是得到结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力和力。

3.2.3.2 基本方程

瞬态动力学求解的运动方程如下：

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F(t)\} \quad (3.6)$$

式中 $[M]$ ——质量矩阵；
 $\{\ddot{U}\}$ ——加速度向量；
 $[C]$ ——阻尼矩阵；
 $[K]$ ——刚度矩阵；
 $\{U\}$ ——位移向量；
 $\{F(t)\}$ ——动载荷向量。

ANSYS 瞬态动力学分析中使用的是瑞利阻尼，其公式如下：

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3.7)$$

式中 α 、 β ——阻尼系数，由振型阻尼比和固有角频率决定：

$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (3.8)$$

式中 ξ ——振型阻尼比，对于桩基平台，CCS 规范中建议取 0.02 ~ 0.05，本计算中取 0.03；
 ω_i ——桩腿第 i 阶的固有角频率，由 $\omega = 2\pi f$ 得到， f 即是模态分析中得到的结构自振频率，由前两阶主频率可得到。

3.2.3.3 求解方法

瞬态动力学的求解方法主要分为振型叠加法和逐步积分法。

(1) 振型叠加法：利用振型矩阵作为变换矩阵，将多自由度系统原本互相耦合的振动方程转化为等量彼此独立的单自由度振动方程并分别求解，以求得的单自由度解作为系数将结构的各阶模态进行叠加求和，最终得出解雇的瞬态响应。

(2) 逐步积分法：将原本在任意时刻 t 都需要满足的运动方程的位移矢量 $X(t)$ 代之以只要在离散时间点满足动力学方程，而在一定时间间隔内，对位移、速度和加速度的关系采取某种假设，这样可由初始条件逐步求出后继各个时间点的响应值。

3.2.3.4 求解步骤

进行瞬态动力学分析，应该采取以下五个步骤：

- (1) 建模：允许所有各种非线性，一定要输入密度。
- (2) 选择分析类型和选项：进入求解器并选择瞬态分析，求解方法中完整矩阵方法为

缺省方法，允许大应变、应力硬化等非线性存在，设置阻尼 α 、 β ，按照模态分析的结果计算阻尼系数。

- (3) 规定边界条件和初始条件。
- (4) 施加时间历程载荷并求解。
- (5) 查看结果。

下 篇

工程实例篇

4 钻井隔水导管结构静力分析

◇ 本章导读

隔水导管在海洋石油钻井的过程中,起到了很重要的作用。虽然隔水导管作为一个相对来说比较简单的海洋石油设备,但其受力状况较为复杂。本章将介绍隔水导管的一些基本知识及其如何利用 ANSYS 对隔水导管进行静力分析等基本操作。

本章主要包括如下的两个内容:

- 钻井隔水导管概述。
- 工程实例:浅海水域隔水导管静力分析。

4.1 钻井隔水导管概述

海洋石油钻井隔水导管是从海上钻井平台下到海底浅层的套管,其主要功能是隔离海水,形成钻井液循环通道,同时作为海上井口的持力结构。在钻完井施工过程中,隔水导管的强度及安全性对于海上钻井作业安全至关重要。

隔水导管一般是以桩基的形式打入或钻入到海底泥面以下的,因此在进行隔水导管强度校核和安全性分析时,可分为泥线以上和泥线以下两部分进行。对于泥线以上部分而言,隔水导管不仅受到比较大的轴向载荷的作用,还要受到横向周期性的风、浪、流载荷的作用,这些载荷对隔水导管强度及安全性都会产生比较大的影响。在对隔水导管强度及安全性计算与分析时,大多数是把隔水导管简化为一端固支一端铰支的梁结构。

4.1.1 隔水导管力学分析模型

隔水导管所受的轴向载荷包括自重和坐挂在井口的压载,其中自重为均匀分布力,坐挂载井口压载为集中力。隔水导管所受的横向载荷主要包括风、浪、流载荷以及上部井口侧向扶正力。

由于隔水导管入泥深度比较深,因此对于隔水导管下部入泥部分的简化,一般工程中取6倍管径处固支,上部由于受到钻井转盘的约束,可以将其简化为横向位移约束。泥线以上管体受力情况如图4.1所示。图中把各种载荷放在一个平面内,即假设隔水导管受力状况最为恶劣。

4.1.2 隔水管的 ANSYS 有限元分析步骤

由于钻井隔水导管所受到的载荷主要来自两部分:一是轴向载荷(井口压载),二是横向载荷(风、浪、流等环境载荷)。ANSYS 单元库中的 PIPE59 单元具有考虑水动效应及波流作用的功能。因而可以利用 ANSYS 很方便地解决钻井隔水导管的

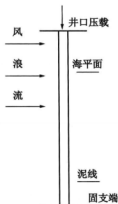


图 4.1 隔水导管受力示意图

受力分析问题。

具体分析步骤如下：

- (1) 对具体的工程问题进行简化，建立分析对象的几何模型；
- (2) 利用相应的计算公式计算风载荷，波流载荷选用相关的波浪理论程序自动求解；
- (3) 建立有限元分析模型，施加边界条件和载荷；
- (4) 设置求解选项并求解；
- (5) 查看分析结果提取相关数据。

4.2 工程实例：浅海水域隔水导管结构静力分析

以某浅海油田为例，分析其钻井隔水导管的受力状况，其基本参数如下：

隔水导管尺寸：外径 533.4mm；壁厚 25.4mm。

材料参数：弹性模量 $2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，泊松比 0.3；密度 7850kg/m^3 。

环境参数：水深 30m；海面以上高度 18m；风速 38m/s；有效波高 8m；有效波周期 7.4s；海面流速 1.93m/s；中部流速 1.47m/s；底部流速 0.96m/s。

井口压载：30t。

对于本工程实例，受力状态与图 4.1 所示是相同的。因而首先需要对相关的参数进行整理计算。根据第 2 章中有关风力的计算规定，可以计算出风载荷为 6675N。

下面按照 ANSYS 操作的先后顺序，对建模和分析过程的步骤进行详细介绍。

4.2.1 前处理

(1) 设置工作环境。

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过常用菜单路径 **【Utility Menu】 > 【File】 > 【Change Jobname】**，指定分析的工作名称为 “Drilling riser_1”，将 “New log and error files?” 选项设置为 **【Yes】**，单击 **【OK】** 按钮，如图 4.2 所示。在命令流对话框输入 “/UNIT,SI”，定义国际单位制。

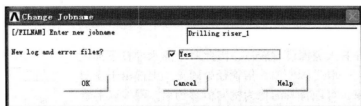


图 4.2 定义工作名

通过菜单项 **【Utility Menu】 > 【File】 > 【Change Title】**，指定图形显示区域的标题为 “Analysis of Drilling riser_1”。

本步骤所对应的命令流如下：

/FILENAME, Drilling riser_1, 1 !设置工作文件名

/TITLE, Analysis of Drilling riser_1 !设置图形显示区域名

(2) 定义单元类型。

设置完成后，单击菜单项 **【Main Menu】 > 【Preprocess】** 进入前处理器 PREP7 开始

建模以及其他的前处理操作。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Element Type】>【Add/Edit/Delete...】，弹出“Element Type”对话框，单击【Add...】按钮，弹出如图 4.3 所示的“Library of Element Types”对话框，选择【Pipe】>【Plast straight 20】，单击【Apply】按钮，再继续选择【Immersed 59】单元，单击【OK】按钮。结果如图 4.4 所示，【PIPE20】单元类型编号为“1”，【PIPE59】单元类型编号为“2”。

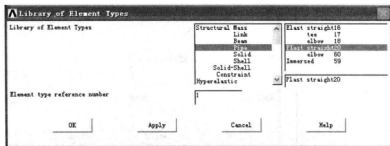


图 4.3 定义单元类型

本步骤所对应的命令流如下：

/PREP7 ! 进入前处理

ET, 1, PIPE20 ! 定义 1 号单元类型

ET, 2, PIPE59 ! 定义 2 号单元类型

(3) 设置单元实常数。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Real Constants】>【Add/Edit/Delete...】，弹出“Element Type for Real Constants”对话框，单击【Add...】按钮，弹出如图 4.5 所示的对话框，选择【Type 1 PIPE20】，单击【OK】，弹出如图 4.6 所示的对话框，在【Outer diameter】中填写“0.5334”，在【Wall thickness】中填写“0.0254”，单击【OK】按钮，再继续选择【Type 2 PIPE59】，单击【OK】按钮，按照图 4.7 所示设置 PIPE59 单元的实常数，完成设置后关闭实常数设置对话框。

本步骤所对应的命令流如下：

R, 1, 0.5334, 0.0254 ! 设置 1 号实常数（针对 PIPE20 单元）

R, 2, 0.5334, 0.0254, 0.7, 2.0, 1030, 0, ! 设置 2 号实常数（针对 PIPE59 单元）

(4) 设置材料参数。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Material Props】>【Material Models】，将出现“Define Material Model Behavior”对话框，在对话框的右侧，依次单击【Structural】>【Linear】>【Elastic】>【Isotropic】，在出现的对话框中输入材料弹性模量“2.1e11”以及泊松比“0.3”，如图 4.8 所示，单击【OK】按钮，继续返回单击【Density】弹出密度设置对话框，设置密度为“7850”，如图 4.9 所示。单击【Fluids】>【Water Table】，按照图 4.10 所示设置环境载荷参数。其中波浪相位角的输入值为“58”。具体搜索过程见本章 4.3 节。



图 4.4 单元类型定义结果

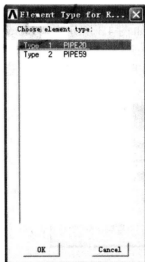


图 4.5 单元实常数设置

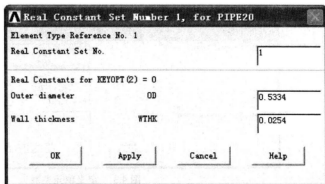


图 4.6 设置 PIPE20 单元实常数

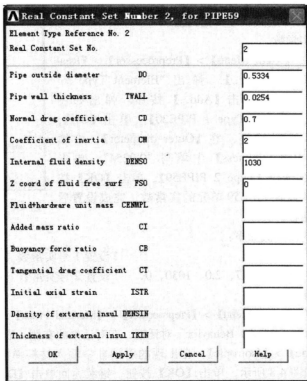


图 4.7 设置 PIPE59 单元实常数

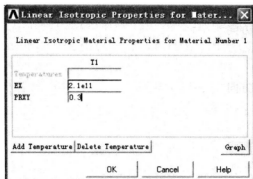


图 4.8 弹性模量泊松比设置

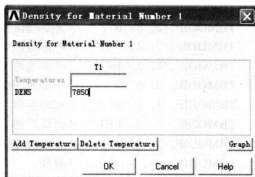


图 4.9 材料密度设置

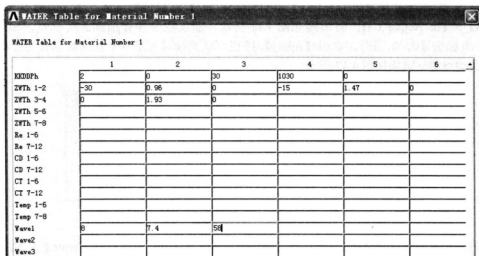


图 4.10 环境载荷参数设置

本步骤所对应的命令流如下:

```

MP, EX, 1, 2.1E11      ! 设置弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3      ! 设置泊松比
MP, DENS, 1, 7850     ! 设置密度
TBDE, WATE, 1         ! 设置波流参数 Water Table
TB, WATE, 1,, 0       ! Water Table
TBMODIF, 1, 1, 2      ! 选择 Stokes 五阶波理论
TBMODIF, 1, 2, 0      ! 波流耦合作用方式
TBMODIF, 1, 3, 30     ! 定义水深
TBMODIF, 1, 4, 1030   ! 海水密度
TBMODIF, 1, 5, 0      ! 波浪作用方向
TBMODIF, 2, 1, -30    ! 底部坐标
  
```



```

TBMODIF, 2, 2, 0.96    ! 底部流速
TBMODIF, 2, 3, 0       ! 底部海流作用方向
TBMODIF, 2, 4, -15     ! 中部坐标
TBMODIF, 2, 5, 1.47    ! 中部流速
TBMODIF, 2, 6, 0       ! 中部海流作用方向
TBMODIF, 3, 1, 0       ! 水面坐标
TBMODIF, 3, 2, 1.93    ! 海面流速
TBMODIF, 3, 3, 0       ! 表面海流作用方向
TBMODIF, 14, 1, 8      ! 波高
TBMODIF, 14, 2, 7.4    ! 波周期
TBMODIF, 14, 3, 58     ! 波浪相位角

```

(5) 建立几何模型。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Modeling】 > 【Create】 > 【Key-points】 > 【In Active Cs】**，将出现如图 4.11 所示，建立位于导管顶部的关键点，编号为“1”，坐标为 (0, 0, 18)，单击 **【Apply】** 按钮，继续建立如表 4.1 所示的其他三个关键点，关键点建立结果如图 4.12 所示。

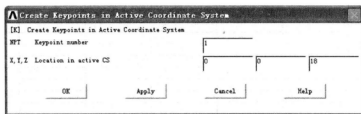


图 4.11 建立关键点

单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Modeling】 > 【Create】 > 【Lines】 > 【Straight Lines】**，弹出“Create Straight Lines”关键点拾取对话框，利用鼠标依次选取刚才建立的关键点 1 和 2，单击 **【Apply】** 按钮，继续选取关键点 2 和 3，用相同的方法选取关键点 3 和 4，单击 **【OK】** 按钮退出。

表 4.1 关键点坐标

关键点编号	坐 标 (笛卡儿坐标系)		
	X	Y	Z
2	0	0	0
3	0	0	-30
4	0	0	-33.2

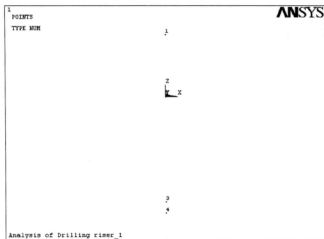


图 4.12 关键点建立结果

本步骤所对应的命令流如下:

```
K, 1, 0, 0, 18      ! 定义 1 号关键点
K, 2, 0, 0, 0       ! 定义 2 号关键点
K, 3, 0, 0, -30     ! 定义 3 号关键点
K, 4, 0, 0, -33.2   ! 定义 4 号关键点
LSTR, 1, 2          ! 创建 1 号线
LSTR, 2, 3          ! 创建 2 号线
LSTR, 3, 4          ! 创建 3 号线
```

(6) 有限元网格划分。

打开【Utility Menu】>【Plot】下拉菜单, 单击【Lines】, 继续打开【PlotCtrls】下拉菜单, 单击【Numbering】, 将【Line Numbers】设置为“ON”。选择菜单项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh Attributes】>【Picked Lines】, 弹出“Lines Attributes”线拾取对话框, 用鼠标在图形显示区域选取 L1 和 L2, 弹出“Assign Attributes to Picked Lines”对话框, 对泥线以上的线单元进行设置, 材料编号选默认, 实常数选“2”, 单元类型选“2 PIPE59”, 其他默认, 单击【Apply】按钮, 继续选取 L3 对泥线以下单元进行设置, 实常数选“1”, 单元类型选“1 PIPE20”, 其他默认, 单击【OK】按钮, 退出单元属性设置选项。

选择菜单路径项【Meshing】>【Size Cntrls】>【ManualSize】>【Lines】>【Picked Lines】, 进行单元长度设置。用鼠标在图形显示区域选取 L1 和 L2, 单击【Apply】按钮, 弹出“Element Sizes on Picked Lines”对话框, 在【Element edge length】后对应的方框内填“1”, 单击【Apply】, 继续选取 L3 将【No.of element divisions】设置为“5”, 即将泥线以上单元长度设置为 1m, 泥线以下分为 5 段, 单击【OK】按钮退出。

选择菜单项【Meshing】>【Mesh】>【Lines】, 选取所有线, 单击【OK】按钮。打开【Utility Menu】>【PlotCtrls】下拉菜单, 选择【Style】>【Size and Shape】, 弹出“Size and Shape”对话框, 将【Display of element】设置为“On”, 单击【OK】退出。至此模型已建立完毕, 结果如图 4.13 所示。

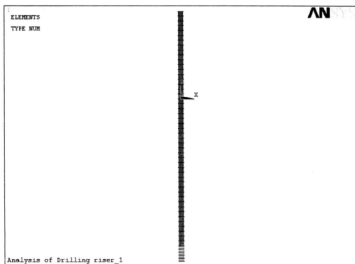


图 4.13 隔水导管有限元模型

本步骤所对应的命令流如下：

```
LSEL, S, LINE, , 1, 2, 1,,      ! 选择 1、2 号线
LATT, 1, 2, 2                  ! 定义线单元属性
LESIZE, ALL, 1,,,,,           ! 将 1、2 号线按 1m 分段
LMESH, ALL                     ! 划分 1、2 线建立 PIPE50 单元
ALLSEL                         ! 选择所有对象
LSEL, S, LINE, , 3             ! 选择 3 号线
LATT, 1, 1, 1                  ! 定义线单元属性
LESIZE, 3, , , 5               ! 将 3 号线划分为 5 段
LMESH, ALL                     ! 划分 3 号线建立 PIPE20 单元
ALLSEL                         ! 选中所有对象
```

(7) 保存有限元模型并退出前处理。

单击常用工具条上的【SAVE DB】按钮保存模型，也可以单击【Utility Menu】>【File】中的保存选项。至此，已完成了除加载之外建模的全部操作，单击【Main Menu】>【Finish】菜单项，退出前处理器。本步骤所对应的命令流如下：

```
SAVE      ! 保存有限元模型
FINISH    ! 退出前处理器
```

4.2.2 求解计算

(1) 设置求解类型。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】菜单项，进入求解器，选择【Analysis Type】>【New Analysis】，弹出分析类型选择对话框，选择分析类型为【Static】，如图 4.14 所示，单击【OK】按钮退出。

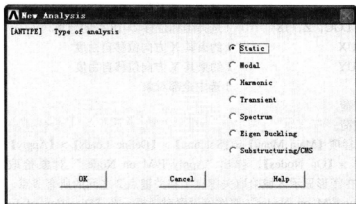


图 4.14 设置分析类型

本步骤所对应的命令流如下：

/SOLU ! 进入求解计算模块

ANTYPE, 0 ! 设置分析类型为静力分析

(2) 设置位移边界条件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Displacement】 > 【On Nodes】**，弹出“Apply U, ROT on Nodes”节点拾取对话框，用鼠标在图形显示区域单击关键点 4 处的一个节点，单击 **【OK】** 按钮，弹出如图 4.15 所示的自由度设置属性对话框，在“DOFs to be constrained”中选择 **【ALL DOF】**，单击 **【Apply】** 按钮，约束此节点的全部自由度。继续拾取位于关键 1 处的节点，在“DOFs to be constrained”中选择 **【UX】** 和 **【UY】**，约束导管上端的横向自由度，单击 **【OK】** 按钮退出。

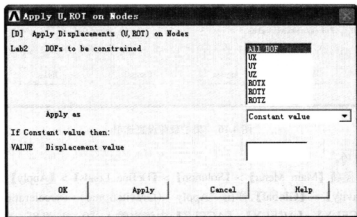


图 4.15 自由度设置选项

本步骤所对应的命令流如下：

NSSEL, S, LOC, Z, -33.2 ! 选择坐标位移 Z=-33.2 处的节点

D, ALL, ALL ! 约束其全部自由度

ALLSEL	! 选中全部对象
NSEL, S, LOC, Z, 18	! 选择坐标位移 Z=18 处的节点
D, ALL, UX	! 约束其 X 方向位移自由度
D, ALL, UY	! 约束其 Y 方向位移自由度
ALLSEL	! 选中全部对象

(3) 施加载荷。

① 定义风载荷。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Force/Moment】 > 【On Nodes】**，弹出“Apply F/M on Nodes”对象拾取对话框，选择 **【Box】**，用鼠标在图形显示区域拾取关键点 1 和关键点 2 之间的所有节点，单击 **【OK】** 按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”属性值设置对话框，在 **【Direction of force/moment】** 中选择 **【FX】**，在 **【Force/moment value】** 中输入“6675/17”（共 17 个节点），如图 4.16 所示，表示风载荷以集中力的方式均匀作用于海面以上的导管结构上。

② 定义顶部井口压载。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Force/Moment】 > 【On Nodes】**，弹出“Apply F/M on Nodes”对象拾取对话框，用鼠标在图形显示区域拾取关键点 1 处节点，单击 **【OK】** 按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”属性值设置对话框，在 **【Direction of force/moment】** 中选择 **【FZ】**，在 **【Force/moment value】** 中输入 **【-3E5】**，单击 **【OK】** 按钮退出。

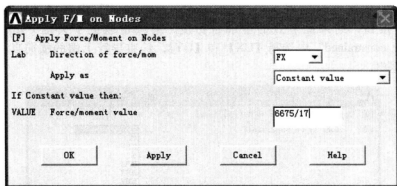


图 4.16 集中载荷设置选项

③ 定义重力场。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Inertia】 > 【Gravity】 > 【Global】**，弹出“Apply (Gravitational) Acceleration”属性值设置对话框，在 **【ACELX】**，**【ACELY】**，**【ACELZ】** 中依次输入“0，0，9.8”，如图 4.17 所示。

由于波流载荷已在“Water Table”中设置，至此，所有的载荷已设置完毕，施加完载荷的导管有限元分析模型如图 4.18 所示。

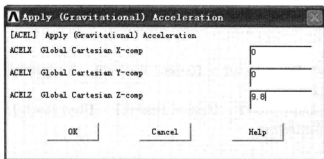


图 4.17 重力场设置选项

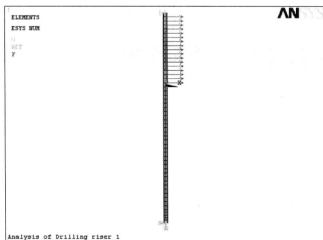


图 4.18 完成位移约束和所有载荷

本步骤所对应的命令流如下：

```

NSEL, S, LOC, Z, 1, 17      ! 选择坐标位移 Z=1 ~ 17 之间的所有节点
F, ALL, FX, 6675/17         ! 施加风载荷 (X 正向)
ALLSEL                      ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, 18         ! 选择顶部节点
F, ALL, FZ, -30E4           ! 施加井口压载
ALLSEL                      ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8             ! 施加惯性力 (重力) 加速度

```

(4) 求解。

通过菜单项 **【Main Menu】>【Solution】>【Solve】>【Current LS】**，对问题进行求解。

在求解结束后，弹出“Solution is done！”信息提示框，关闭。

单击 **【Main Menu】>【Finish】** 菜单项，退出求解计算模块。

本步骤所对应的命令流如下：

```

SOLVE      ! 求解计算
SAVE       ! 保存计算结果

```

FINISH !退出求解计算模块

4.2.3 结果分析

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】，进入通用后处理模块。

(1) 读入结果文件。

选择菜单路径【Main Menu】>【General Postproc】>【Read Results】，单击【Last Set】，读入最后一个子步的结果文件。

(2) 结果查看。

①绘制结构整体变形图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Deformed Shape】，弹出如图 4.19 所示对话框，选择【Def shape only】，显示结构整体变形图，如图 4.20 所示。

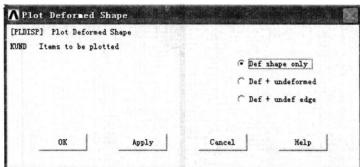


图 4.19 整体变形图查看设置

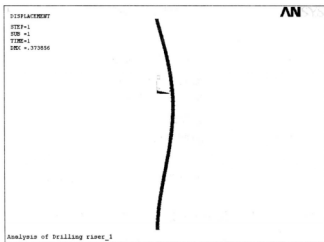


图 4.20 结构整体变形图

②绘制结构节点位移等值线云图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>

【Nodal Solu】，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，依次单击【Nodal Solution】>【DOF Solution】>【Displacement vector sum】，单击【OK】按钮，显示如图 4.21 所示的结构节点位移等值线云图。从图中可以看出，结构发生最大位移的位置位于水面以下 5m 附近，具体的数值可以通过【List】选项进行查看。选择路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【List Results】>【Nodal Solution】，弹出“List Nodal Solution”对话框，依次单击【Nodal Solution】>【DOF Solution】>【Displacement vector sum】，单击【OK】按钮，显示如图 4.22 所示的结构节点位移数值图，可以看出，结构最大位移值为 0.37386m，位于水面以下 7m 处。

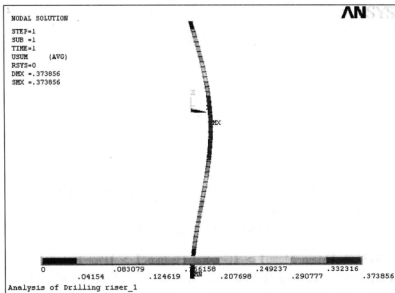


图 4.21 节点位移等值线云图

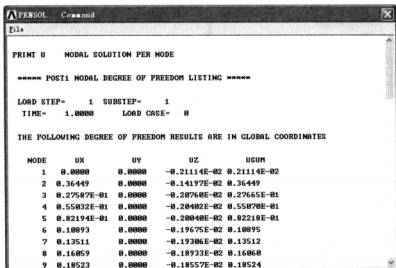


图 4.22 节点位移值显示

③绘制单元应力及应变等值线云图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Element Solu】，弹出“Contour Element Solution Data”对话框，依次单击【Element Solution】>【Stress】>【von Mises stress】，单击【OK】按钮，如图 4.23 所示显示结构的米塞斯等效应力云图。

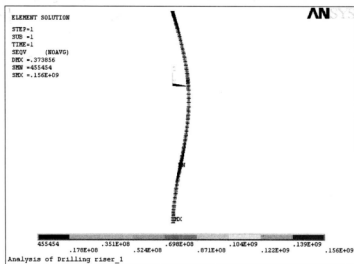


图 4.23 单元等效应力云图

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Element Solu】，弹出“Contour Element Solution Data”对话框，依次单击【Element Solution】>【Total Strain】>【von Mises total strain】，单击【OK】按钮，如图 4.24 所示显示结构全部等效应变分布云图。

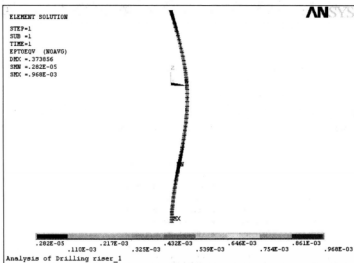


图 4.24 单元等效应变分布云图

④绘制结构弯矩图。

通过定义单元表，绘制结构弯矩图。

选择菜单路径【Main Menu】>【General Postproc】>【Element Table】>【Define Table】，弹出“Element Table Data”对话框，单击【Add】按钮，弹出如图 4.25 所示的对话框，在【Lab】选项后的文本框中输入“MOMENT_I”，定义单元 I 节点的弯矩，在【Item, Comp】选项后的左下拉框选中“By sequence num”，然后在右下拉列表框中选择“SMISC”，接着在其下面的文本框中将内容补充为“SMISC, 5”，如图 4.25 所示，单击【Apply】按钮，继续在【Lab】选项后的文本框中输入“MOMENT_J”，定义单元 J 节点的弯矩，在【Item, Comp】选项后的左下拉列表框选中“By sequence num”，然后在右下拉列表框中选择“SMISC”，接着在其下面的文本框中将内容补充为“SMISC, 11”，单击【OK】按钮退出。

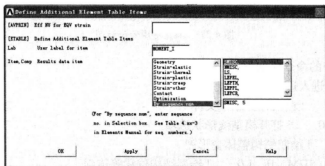


图 4.25 单元表选项设置

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Line Elem Res】，弹出“Plot Line—Element Results”对话框，如图 4.26 所示。在【LabI】选项后的下拉列表中选中“MOMENT_I”，在【LabJ】选项后的下拉列表中选中“MOMENT_J”，其他选项默认，单击【OK】按钮，显示如图 4.27 所示的单元弯矩分布云图。由图中可以看出，结构最大弯矩出现在水面附近。

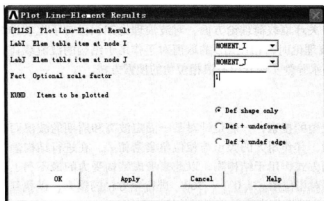


图 4.26 弯矩显示设置

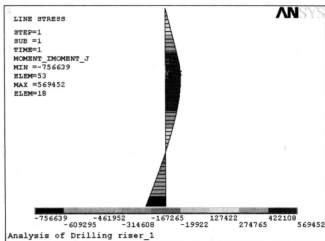


图 4.27 单元弯矩分布云图

结果分析部分的命令流如下：

```

/POST1      ! 进入通用后处理器
SET, LAST   ! 读入计算结果文件
/ESHAPE, 1.0 ! 打开模型线形状选项
PLDISP, 0   ! 绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1.0 ! 绘制结构位移等值图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0 ! 绘制结构等效应力分布云图
PLNSOL, EPTO, EQV, 0, 1.0 ! 绘制结构等效应变分布云图
ETABLE, MOMENT_I, SMISC, 5 ! 定义 I 端节点弯矩
ETABLE, MOMENT_J, SMISC, 11 ! 定义 J 端节点弯矩
PLLS, MOMENT_I, MOMENT_J, 1, 0 ! 绘制弯矩图
  
```

4.3 波浪相位角搜索实例

在第 2 章中有关环境载荷理论方面，对波浪理论知识已有了比较详细的叙述。如果采用 STOKES 五阶波理论时，相位角 φ 的取值对于作用于结构的波流载荷值影响较大。本节将结合前一节的隔水导管实例介绍波浪相位角的搜索方法。

4.3.1 基本过程

对于波浪相位角的搜索，一般是针对某一固定波高和周期的波浪而言的。当已知的波浪作用于结构物时，其作用力的大小与相位角紧密相关。在进行结构静力分析时，假定波浪以最大作用力的方式作用于结构物，以此来考虑结构受力的最不利工况。因此在进行静力分析之前，需要对相位角 φ 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 进行全方位的搜索，以找到波流耦合力最大时的相位角取值，以此结果作为静力分析时的输入条件。

其基本的求解步骤如下：

- (1) 建立结构的有限元模型：这一步与静力分析相同。
- (2) 设置环境载荷参数：其中将波浪相位角处留空。
- (3) 设置边界条件：可以适当进行简化，以方便求结构反力。
- (4) 编制相关的程序进行波浪相位角搜索。
- (5) 结果分析，获得极限载荷值及相对应的相位角。

4.3.2 实例分析

以 4.1 节的隔水导管为实例，进行相位角搜索。

- (1) 建立结构有限元模型：与 4.1 节相同。
- (2) 设置环境参数：除波浪相位角处留空，其他参数与 4.2 节相同。
- (3) 设置边界条件：为了方便结构反力的提取，只将结构最底端节点进行全部自由度约束，另外，必须输入重力加速度。

(4) 搜索程序：利用 ANSYS 的 APDL 命令流的功能编制波浪相位角搜索程序，命令流如下：

```
*DIM, WLX, ARRAY, 361, 1, 1, , , , !定义用于储存相位角的一维数组
*DIM, WLFX, ARRAY, 361, 1, 1, , , !定义用于储存波流耦合力值的一维数组
*DO, I, 0, 360, 1 !定义相位角范围 0° ~ 360°，并开始循环
*SET, WLX (I+1), I !将相位角值储存于 WLX 数组
/PREP7 !进入前处理模块
TBDATA, 81, I !将相位角取值赋予 Water Table
/SOLU !进入求解计算模块
TIME, 1 !定义结束时间
SOLVE !开始求解
*GET, RFX, NODE, 50, RF, FX !提取该节点 X 方向的反力
*SET, WLFX (I+1), - (RFX) !将所提取的反力取相反数后储存于 WLFX 数组
*ENDDO !结束循环
*CREATE, ANSUO !创建一个文件
*CFOPEN, 'RFORCE', 'OUT', " !打开文件
*VWRITE, WLX (1), WLFX (1), , , , , , !写入文件
(3F15.4)
*CFCLOS
*END
/INPUT, ANSUO
```

(5) 提取分析结果：根据分析结果数据作出波流耦合力—相位角关系曲线，如图 4.28 所示。结合结果文件数据，可得出当波流耦合力最大时，相对应的相位角为 58°，即 4.2 节静力分析时所输入的值。

4.4 本章小结

本章主要介绍了钻井隔水导管的静力分析过程。首先介绍了隔水导管的功能及其受

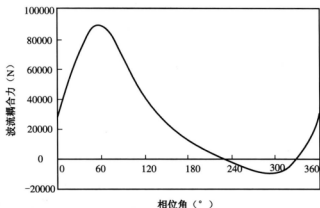


图 4.28 波浪耦合力—相位角关系曲线

力特点；接着结合工程实力详细地介绍了隔水导管的模型建立、载荷的设置、求解过程及后处理的基本操作；最后介绍了波浪相位角的搜索方法。通过本章的学习，读者可以掌握 ANSYS 软件的基本操作过程，以及对隔水导管进行简单的静力学分析和波浪相位角的搜索方法。另外，本章后的附录部分，利用 ANSYS 参数化给出了 APDL 命令流，读者可以对参数进行修改后直接用于其他类似的隔水导管分析。

附录：本章实例 APDL 建模及分析命令流

```

!*****
!***** 浅海水域钻井隔水导管结构静力分析命令流
!*****

/FILNAME, Drilling riser_1, 1 !设置工作文件名
/TITLE, Analysis of Drilling riser_1 !设置图形显示区域名
!***** 定义环境载荷参数
Dwater=30 !水深
H_wave=8 !波高
T_wave=7.4 !波周期
V_surface=1.93 !水面处海流速度
V_middle=1.47 !中部海流速度
V_bottom=0.96 !底部海流速度
! ***** 定义导管参数
OD=0.5334 !导管外径
TW=0.0254 !导管壁厚
!***** 定义桩顶载及风载
F_top=-3e5 !井口压载
F_wind=6675 !风载荷
!***** 前处理过程
/PREP7 !进入前处理
ET, 1, PIPE20 !定义 1 号单元类型
ET, 2, PIPE59 !定义 2 号单元类型
R, 1, OD, TW !设置 1 号实常数（针对 PIPE20 单元）

```

```

R, 2, OD, TW, 0.7, 2.0, 1030, 0, !设置2号实常数(针对 PIPE59 单元)
MP, EX, 1, 2.1E11 !设置弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3 !设置泊松比
MP, DENS, 1, 7850 !设置密度
TBDE, WATE, 1 !设置波流参数 Water Table
TB, WATE, 1,, 0 !Water Table
TBMODIF, 1, 1, 2 !选择 Stokes 五阶波理论
TBMODIF, 1, 2, 0 !波流耦合作用方式
TBMODIF, 1, 3, Dwater !定义水深
TBMODIF, 1, 4, 1030 !海水密度
TBMODIF, 1, 5, 0 !波浪作用方向
TBMODIF, 2, 1, -Dwater !底部坐标
TBMODIF, 2, 2, V_bottom !底部流速
TBMODIF, 2, 3, 0 !底部海流作用方向
TBMODIF, 2, 4, - Dwater/2 !中部坐标
TBMODIF, 2, 5, V_middle !中部流速
TBMODIF, 2, 6, 0 !中部海流作用方向
TBMODIF, 3, 1, 0 !水面坐标
TBMODIF, 3, 2, V_surface !海面流速
TBMODIF, 3, 3, 0 !表面海流作用方向
TBMODIF, 14, 1, H_wave !波高
TBMODIF, 14, 2, T_wave !波周期
TBMODIF, 14, 3, 58 !波浪相位角
!***** 建立几何模型
CSYS, 0 !笛卡尔坐标系为当前坐标系
K, 1, 0, 0, 18 !定义1号关键点
K, 2, 0, 0, 0 !定义2号关键点
K, 3, 0, 0, -30 !定义3号关键点
K, 4, 0, 0, -33.2 !定义4号关键点
LSTR, 1, 2 !创建1号线
LSTR, 2, 3 !创建2号线
LSTR, 3, 4 !创建3号线
LSEL, S, LINE, , 1, 2, 1,, !选择1、2号线
LATT, 1, 2, 2 !定义线单元属性
LESIZE, ALL, 1,,,,, !将1、2号线按1m分段
LMESH, ALL !划分1、2线建立 PIPE50 单元
ALLSEL !选择所有对象
LSEL, S, LINE, , 3 !选择3号线
LATT, 1, 1, 1 !定义线单元属性
LESIZE, 3, , , 5 !将3号线划分为5段
LMESH, ALL !划分3号线建立 PIPE20 单元
ALLSEL !选中所有对象
SAVE !保存有限元模型
FINISH !退出前处理器
!***** 求解过程
/SOLU !进入求解计算模块

```

```

ANTYPE, 0          ! 设置分析类型为静力分析
NSEL, S, LOC, Z, -33.2 ! 选择坐标位移 Z=-33.2 处的节点
D, ALL, ALL        ! 约束其全部自由度
ALLSEL             ! 选中全部对象
NSEL, S, LOC, Z, 18 ! 选择坐标位移 Z=18 处的节点
D, ALL, UX          ! 约束其 X 方向位移自由度
D, ALL, UY          ! 约束其 Y 方向位移自由度
ALLSEL             ! 选中全部对象
NSEL, S, LOC, Z, 1, 17 ! 选择坐标位移 Z=1 ~ 17 之间的所有节点
F, ALL, FX, F_wind/17 ! 施加风载荷 (X 正向)
ALLSEL             ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, 18 ! 选择顶部节点
F, ALL, FZ, F_top ! 施加井口压载
ALLSEL             ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8     ! 施加惯性力 (重力) 加速度
SOLVE              ! 求解计算
SAVE               ! 保存计算结果
FINISH             ! 退出求解计算模块
!***** 后处理过程
/POST1             ! 进入通用后处理器
SET, LAST          ! 读入计算结果文件
/ESHAPE, 1.0       ! 打开模型线形状选项
PLDISP, 0          ! 绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1.0 ! 绘制结构位移等值图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0 ! 绘制结构等效应力分布云图
PLNSOL, EPTO, EQV, 0, 1.0 ! 绘制结构等效应变分布云图
ETABLE, MOMENT_I, SMISC, 5 ! 定义 I 端节点弯矩
ETABLE, MOMENT_J, SMISC, 11 ! 定义 J 端节点弯矩
PLLS, MOMENT_I, MOMENT_J, 1, 0 ! 绘制弯矩图
!***** 波浪相位角搜索程序
! 建模部分与前述相同
/PREP7
D, 50, ALL
ACEL, 0, 0, 9.8
*DIM, WLX, ARRAY, 361, 1, 1, , , ! 定义用于储存相位角的一维数组
*DIM, WLFX, ARRAY, 361, 1, 1, , , ! 定义用于储存波浪耦合力值的一维数组
*DO, I, 0, 360, 1 ! 定义相位角范围 0° ~ 360°, 并开始循环
*SET, WLX (I+1), I ! 将相位角值储存于 WLX 数组
/PREP7 ! 进入前处理模块
TBDATA, 81, I ! 将相位角取值赋予 Water Table
/SOLU ! 进入求解计算模块
TIME, 1 ! 定义结束时间
SOLVE ! 开始求解
*GET, RFX, NODE, 50, RF, FX ! 提取该节点 X 方向的反力
*SET, WLFX (I+1), - (RFX) ! 将所提取的反力取相反数后储存于 WLFX 数组
*ENDDO ! 结束循环

```

```
*CREATE, ANSUO          !创建一个文件
*CFOPEN, 'RFORCE', 'OUT', " !打开文件
*VWRITE, WLX (1), WLFX (1), , , , , , !写入文件
(3F15.4)                !
*CFCLOS
*END
/INPUT, ANSUO
```


5 平台桩腿与海底土相互作用模拟

◇ 本章导读

桩土相互作用的研究一直是一个比较复杂的问题,本章将对桩土相互作用中的一个基本理论 $P-y$ 进行介绍,并介绍 $P-y$ 曲线法如何在 ANSYS 结构分析中得以实现。

本章主要包括如下的四个内容:

- 桩土相互作用概述。
- $P-y$ 曲线理论。
- $P-y$ 曲线法的 ANSYS 实现。
- 工程实例:平台桩土相互作用分析。

5.1 桩土相互作用概述

海洋石油导管架平台的桩基基本都是采用打入的方式插入海底土某一深度处,设置桩基的目的是为了承受竖向与横向的载荷,桩通过桩侧摩阻力和桩端阻力将上部的竖向载荷传递到深部土层或岩层,因而,桩的竖向承载力与桩所穿过的整个土层和桩底持力层的性质、桩的外形和尺寸密切相关。而桩所承受的横向载荷则通过桩身传给侧向土体,其横向承载力同桩侧上的抗力系数、桩身的抗弯刚度与强度密切相关。因此,对桩土相互作用机理的研究是分析桩腿承载力乃至整个平台承载力所必须要考虑的问题。

水平载荷作用下桩的工作性能是桩土相互作用的问题,桩利用桩周土的抗力来承担水平载荷,桩身在水平载荷和力矩的作用下产生水平位移和弯曲应力。外力的一部分由桩身承担,另一部分通过桩传递给土体,促使桩周土体发生相应的变形而产生抗力。在较低的载荷下,土壤虽然处于弹性压缩阶段,但是有相当充分的移动,随着水平载荷的增加,表层土逐渐产生塑性屈服,从而使水平载荷向更深的土层传递。因此,在水平载荷的作用下的土壤变形一部分是弹性的,一部分是塑性的,增加了问题的复杂性。长久以来,人们对水平承载桩的桩土共同作用机理进行了持续的研究和讨论,主要是以水平载荷作用下土中的桩挠曲微分方程为基础来进行的,这个基本方程的表达式为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + bP(x, y) = 0 \quad (5.1)$$

式中 $P(x, y)$ ——地基反力;

y ——挠度;

x ——沿桩身的长度;

EI ——桩的抗弯刚度;

b ——桩截面的计算宽度。

目前计算水平载荷作用下桩土相互作用常用的还是地基反力法,即忽略土的连续性,认为某点的抗力只与该点的位移有关。

地基反力法应用 Winkler 地基模型,把桩周土离散为一个一个单独作用的弹簧。某一弹簧受力时,仅该弹簧发生与作用力成正比例的压缩而和其他弹簧无关。这种把地基土看做非连续介质且水平地基反力系数在整个位移过程中均为常数的假定虽与实际不符,但与目前较复杂的一些其他解析方法相比较,它在许多情况下可得出接近实际的桩性状,所以仍不失为目前较为广泛采用的一种方法。在地基反力法中应用最广泛的是 $P-y$ 曲线法。

5.2 $P-y$ 曲线理论

$P-y$ 曲线法就是在水平力 H 的作用下,泥面以下深度 X 处的土反力 P 与该点桩的挠度 y 之间的关系曲线。它综合反映了桩周土的非线性、桩的刚度和外荷作用性质等特点。

$P-y$ 曲线代表土壤面以下任意深度土壤的变形,而变形时所施加水平压力的范围是从 0 一直增加到土壤极限剪切屈服阶段。它保证了桩土之间的变形协调,适用于线性和非线性、静载和循环载荷,在一定程度上避免了单一参数的缺陷,被认为是比较先进和有前途的方法。在工程实践中,根据桩型或地基土的类型采用不同方法来预估 $P-y$ 曲线,常用的有 Matlock 的判断准则和 Reese 与 Welch 发展的相关性方法等。这些方法的使用,要取得地基土抗剪强度和有效容重沿深度的最可能估计的分布规律和相当于最大主应力差的一半的应变值,然后按给定的公式计算极限土抗力及其相应的挠度和描绘 $P-y$ 曲线。 $P-y$ 曲线法可以描述横向载荷作用下地基土的一些普遍反应:

(1) $P-y$ 曲线随深度而变形成一曲线族,利用预估 $P-y$ 曲线的方法获得一组曲线后,则可进而求得该桩所承受载荷下的桩挠度、桩转角、弯矩、剪力和土反力。

(2) $P-y$ 曲线只是表征横向载荷作用下的土反应,求解横向载荷桩问题,还要考虑桩的工作状态。即在确定桩的横向容许承载力时,必须同时考虑桩和桩侧土两方面的反应,以及它们的协同工作。通常情况下是将横向承载桩的性状看做是与一个竖向的线弹性地基上梁的性状类似。

(3) 在所有的均质土中 $P-y$ 关系是非线性的, $P-y$ 曲线族随深度变化的形式表明, $P-y$ 曲线与桩的形状及刚度无关,它代表土壤在垂直分离面上的变形,而该变形不受上面及下面土壤加载的影响。

许多因素都会影响 P 和 y 的关系,比如土的性质、桩的刚度、打入方法、载荷形式与加载时间等,除了利用公式计算,进行现场试验也可以确定 $P-y$ 曲线。

5.2.1 软黏土中的 $P-y$ 曲线

(1) 确定桩侧极限土抗力 P_u 。

设 x_R 为极限水平承载力的转折点深度,通常认为在 x_R 范围以内为浅层土, x_R 以下为深层土, x_R 可由下式估算:

$$x_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{C_u} + J} \quad (5.2)$$

式中 D ——桩径, mm;

γ ——土体有效容重, N/m^3 ;

C_u ——原状土不排水抗剪强度, kPa ;

J ——无因次常数, 其值在 0.25 ~ 0.5 之间, 土较硬取小值。

泥面以下深度为 x 处的桩侧极限土抗力 P_u 值按下式确定:

$$\begin{aligned} P_u &= 3C_u + \gamma x + J \frac{x C_u}{D} & (0 \leq x \leq x_R) \\ P_u &= 9C_u & (x > x_R) \end{aligned} \quad (5.3)$$

(2) P — y 曲线。

如图 5.1 所示, 软黏土的 P — y 曲线分为三个部分, 分别由一条曲线和三条直线组成。

其中 OCDEF 段为短期静载荷作用下的 P — y 曲线, 当 $0 < y/y_c < 8$ 时, 其公式如下:

$$\frac{P}{P_u} = 0.5 \left(\frac{y}{y_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.4)$$

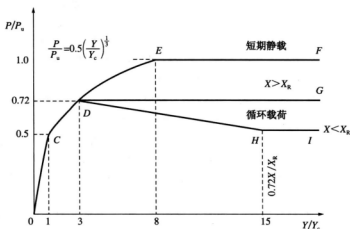


图 5.1 软黏土 P — y 曲线

当 $y/y_c \geq 8$ 时, $P=P_u$, 式中 y_c 是达到极限土抗力之半时的位移值。其计算公式为: $y_c = 2.5\varepsilon_0 D$; 式中, ε_0 是原状土不排水试验, 在 1/2 最大应力时出现的应变。

OCDHI 段曲线适用于 $x < x_R$ 时循环载荷, OCDG 段曲线适用于 $x \geq x_R$ 时循环载荷, 各特征坐标如图 5.1 所示。

5.2.2 砂土中的 P — y 曲线

(1) 确定桩侧极限土抗力 P_u 。

对于砂性土, 浅层土与深层土的桩侧极限土抗力转折点 x_R 计算公式如下:

$$x_R = \frac{(C_3 - C_2)D}{C_1} \quad (5.5)$$

式中 C_1, C_2, C_3 ——系数, 以 ϕ 为参数, 查图 5.2 可得;

D ——桩径;

ϕ ——砂性土内摩擦角。

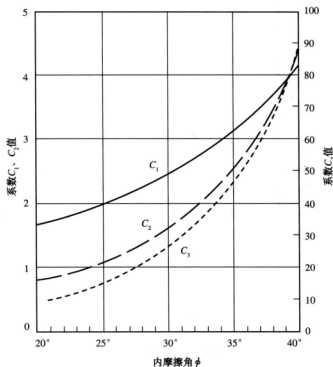


图 5.2 内摩擦角与 C_1 、 C_2 、 C_3 系数关系

当 $x < x_R$ 时 (浅层土), 砂性土桩侧极限土抗力 P_u 计算公式如下:

$$\begin{aligned} P_u &= (C_1 x + C_2 D) \gamma x & (x < x_R) \\ P_u &= C_3 D \gamma x & (x \geq x_R) \end{aligned} \quad (5.6)$$

(2) P — y 曲线。

某一给定深度 x 的砂性土 P — y 曲线可用下式表示:

$$P = AP_u \tanh \left[\frac{kx}{AP_u} y \right] \quad (5.7)$$

式中 A ——考虑循环载荷或短期静载状态的系数, 按以下选取: 循环载荷 $A=0.9$, 短期静

$$\text{载 } A = \left(3.0 - 0.8 \frac{x}{D} \right) \geq 0.9;$$

k ——初始模量, 以内摩擦角 ϕ 为参数, 查图 5.3 确定。

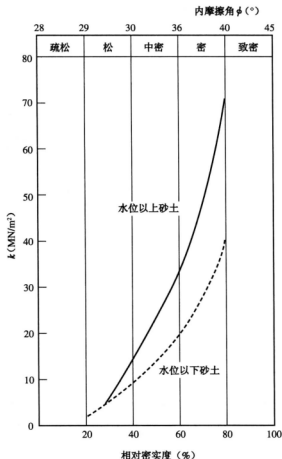


图 5.3 内摩擦角与相对密实度关系

5.2.3 硬黏土中的 P — y 曲线

硬黏土比软黏土更具脆性，在静载荷条件下，对于 C_u 大于 90kPa 的硬黏土，其桩侧极限土抗力 P_u 与软黏土一样，在 $8C_u$ 到 $12C_u$ 之间；而在循环载荷条件下 P_u 值有很大的减小。

硬黏土也具有非线性的应力—应变关系，因此需要 P — y 曲线能够反映在大挠度下硬黏土的承载力迅速下降的性质。在工程中，一般采用现场土的试验资料绘制它的 P — y 曲线。

5.3 P — y 曲线法的 ANSYS 实现

ANSYS 单元库中的 COMBIN39 单元，其 F — D 实常数表示力与位移之间的关系，而 P — y 曲线中的 P 与 y 表示的是力与位移之间的关系。因此，可以将利用 COMBIN39 单元来表达 P — y 曲线，即实现了桩土相互作用的 ANSYS 表达。

利用 COMBIN39 单元实现 $P-y$ 曲线法来描述桩土相互作用关系的具体步骤如下:

- (1) 获得分析对象所在海域的土质 $P-y$ 曲线数据;
- (2) 将泥线至桩腿底端之间的土壤按一定深度分层;
- (3) 针对每个深度所对应的土层建立 COMBIN39 单元;
- (4) 将不同深度下的土壤 $P-y$ 曲线数据对作为相应位置 COMBIN39 单元的 $F-D$ 实常数输入;
- (5) 进行相关力学分析。

5.4 工程实例：平台桩土相互作用分析

本节以涠洲海域某单腿平台（见图 5.4）为例，详细介绍考虑桩土相互作用下平台桩腿力学分析的 ANSYS 操作过程。

平台基本参数如下:

桩腿尺寸: 外径 1524mm, 壁厚 54mm。

材料参数: 弹性模量 $2.1\text{E}11\text{Pa}$, 泊松比 0.3, 密度 7850kg/m^3 。

环境参数: 水深 28m, 海面以上高度 15m, 风速 46m/s , 有效波高 13.8m, 有效波周期 10s, 海面流速 1.73m/s , 中部流速 1.37m/s , 底部流速 0.95m/s 。

平台载荷: 200t。

$P-y$ 参数如表 5.1 所示。

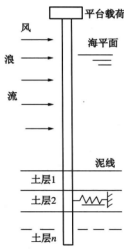


图 5.4 平台桩土相互作用模型

表 5.1 $P-y$ 曲线数据

泥深 (m)	$P-y$ 数据 [$P(\text{N})/y(\text{m})$]					
0	0	1050.756	1751.26	2626.89	3677.646	4553.276
	0	0.001524	0.006096	0.024384	0.06096	0.12192
1	0	3677.646	5954.284	9456.804	12784.2	16111.59
	0	0.01524	0.06096	0.24384	0.6096	1.2192
2	0	5253.78	10507.56	15761.34	18213.1	20839.99
	0	0.000762	0.001778	0.002794	0.003556	0.004318
3	0	17862.852	35725.704	53588.56	62344.86	71276.28
	0	0.00127	0.002794	0.004826	0.005842	0.00762
4	0	38177.468	76354.936	114357.3	133446	152534.7
	0	0.002032	0.004064	0.006604	0.008128	0.010414
5	0	64971.746	130118.62	195090.4	227663.8	260062.1
	0	0.00254	0.00508	0.008382	0.010414	0.013208
...	...					

下面按照 ANSYS 操作的先后顺序,对建模和分析过程的步骤进行详细介绍。

5.4.1 前处理过程

(1) 设置工作环境。

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后,通过常用菜单路径【Utility Menu】>【File】>【Change Jobname】,指定分析的工作名称为“Pile-soil interaction”,将“New log and error files?”选项设置为【yes】,单击【OK】按钮。在命令流对话框中输入“/UNIT, SI”,定义国际单位制。通过菜单项【Utility Menu】>【File】>【Change Title】,指定图形显示区域的标题为“Analysis of Pile-soil interaction”。

(2) 定义单元类型。

设置完成后,单击菜单项【Main Menu】>【Preprocessor】,进入前处理器 PREP7 开始建模以及其他的前处理操作。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Element Type】>【Add/Edit/Delete...】,定义 3 种单元类型,命令流操作如下:

ET, 1, PIPE16 ! 定义 1 号单元为 PIPE16

ET, 2, PIPE59 ! 定义 2 号单元为 PIPE59

ET, 3, COMBIN39 ! 定义 3 号单元为 COMBIN39

(3) 设置单元实常数。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Real Constants】>【Add/Edit/Delete...】,弹出“Element Type for Real Constants”对话框,单击【Add...】按钮,设置管单元实常数。利用命令流设置如下:

R, 1, 1.524, 0.05 ! 定义 1 号实常数 (针对 PIPE16)

R, 2, 1.524, 0.05, 0.7, 2.0, 1030, 0, ! 定义 2 号实常数 (针对 PIPE59)

其中 1 号实常数对应 PIPE16 单元, 2 号实常数对应 PIPE59 单元,接着需要定义 21 个 COMBIN39 的单元实常数,选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Real Constants】>【Add/Edit/Delete...】,弹出“Element Type for Real Constants”对话框,单击【Add...】按钮,选择“Type 3 COMBIN39”,单击【OK】按钮,弹出如图 5.5 所示的“D—F”实常数设置,每一个实常数编号对应一个深度下的 P — y 曲线数,其中“D”对应 P — y 曲线数据中的“ y ”对应,“F”与“P”对应,设置一个单元实常数之后,单击【Apply】按钮,进行下一个“D—F”实常数的输入,共定义 21 组,对应建立 21 个非线性弹簧单元。如果采取命令流的方式,见本章附录部分。

(4) 设置材料参数。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Material Props】>【Material Models】,将出现“Define Material Model Behavior”对话框,在对话框的右侧,依次单击【Structural】>【Linear】>【Elastic】>【Isotropic】,在出现的对话框中输入材料弹性模量“2.1E11”以及泊松比“0.3”,单击【OK】按钮,继续返回,单击【Density】弹出密度设置对话框,设置密度为“7850”。单击【Fluids】>【Water Table】,按照图 5.6 所示设置环境载荷参数。

(5) 建立几何模型。

本例将采用直接通过建立节点的方法建立有限元模型。

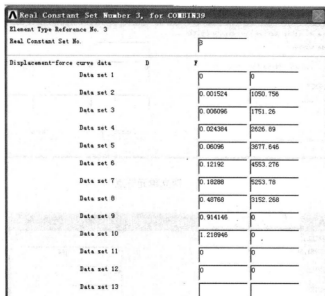


图 5.5 设置 COMBIN39 单元实常数

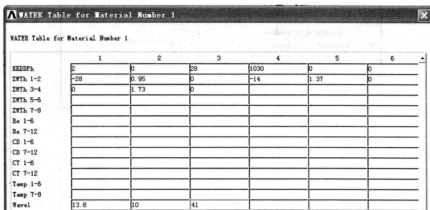


图 5.6 环境载荷参数设置

① 建立单元节点。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Nodes】>【In Active Cs】**，将出现如图 5.7 所示的对话框，建立位于桩腿顶部的节点，编号为“1”，坐标为 (0, 0, 15)，单击 **【Apply】** 按钮，继续定义节点编号为“44”，坐标为 (0, 0, -28)，即泥线处单元节点，单击 **【Apply】** 按钮，接着定义节点编号为“64”，坐标为 (0, 0, -48)，即桩端部节点（桩土相互作用模拟深度假设 20m），单击 **【OK】** 按钮。选择菜单 **【Create】>【Nodes】>【Fill between Nds】**，弹出节点拾取对话框，利用鼠标在图形显示区域拾取节点 1 和 44，单击 **【OK】** 按钮，弹出如图 5.8 所示对话框，所有选项默认，单击 **【Apply】** 按钮，继续选中 44 和 64 节点，进行节点填充操作，结果如图 5.9 所示。

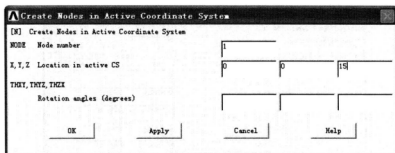


图 5.7 建立单元节点

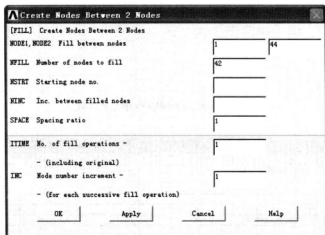


图 5.8 单元节点填充设置

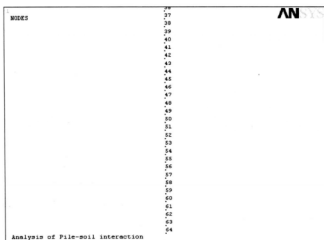


图 5.9 节点填充结果

按照上述同样的操作，建立 COMBIN39 单元的节点，定义编号为“65”的节点，坐标为 (1, 0, -28) 及编号为 85 的节点，坐标为 (1, 0, -48)，然后进行节点填充操作。此部分的命令流操作如下：

```
N, 1, 0, 0, 15      ! 建立 1 号节点
N, 44, 0, 0, -28    ! 建立 44 号节点
FILL                ! 在节点 1 和 44 之间自动插入生成 2 ~ 43 节点
N, 64, 0, 0, -48    ! 建立 64 号节点
FILL                ! 在节点 44 和 64 之间自动插入生成 45 ~ 63 节点
N, 65, 1, 0, -28    ! 建立 65 号节点
N, 85, 1, 0, -48    ! 建立 85 号节点
FILL                ! 在节点 65 和 85 之间自动插入生成 66 ~ 84 节点
```

②通过节点建立单元。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Elements】>【Elem Attributes】**，弹出“Element Attributes”对话框，在 **【TYPE】** 选项后的下拉框中选中“2 PIPE59”，在 **【MAT】** 选项后的下拉列表中选中“1”，在 **【REAL】** 选项后的下拉列表中选择“2”单元实常数。单击 **【OK】** 按钮。单击 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Elements】>【Auto Numbered】>【Thru Nodes】**，弹出节点拾取对话框，利用鼠标在图形显示区域选中节点 1 和 2，单击 **【Apply】** 按钮，继续选择节点 2 和 3，3 和 4，…，43 和 44。单击 **【OK】** 按钮。

按照上述相同的操作过程，创建泥线以下桩腿单元和非线性弹簧单元，最终建立的有限元模型如图 5.10 所示。如采用循环语句建立单元的命令流如下：

```
TYPE, 2              ! 选择 2 号单元类型
REAL, 2              ! 选择 2 号实常数
MAT, 1               ! 选择 1 号材料模型
*DO, I, 1, 43, 1
E, I, I+1
*ENDDO               ! 泥线以上 PIPE59 单元
TYPE, 1              ! 选择 1 号单元类型
REAL, 1              ! 选择 1 号实常数
MAT, 1               ! 选择 1 号材料模型
*DO, I, 44, 63, 1
E, I, I+1
*ENDDO               ! 泥线以下 PIPE16 单元
TYPE, 3              ! 选择 3 号单元类型
*DO, I, 3, 23, 1
REAL, I              ! 选择 I 号实常数
E, I+41, I+62        ! 非线性弹簧单元
*ENDDO
```

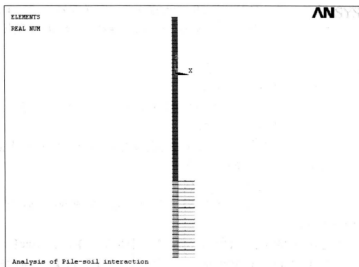


图 5.10 桩土相互作用有限元模型

(6) 保存有限元模型并退出前处理。

单击常用工具条上的【SAVE DB】按钮保存模型，也可以单击【Utility Menu】>【File】中的保存选项。至此，已完成了除加载之外建模的全部操作，单击【Main Menu】>【Finish】菜单项，退出前处理器。

5.4.2 静力求解计算

(1) 设置求解类型。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】菜单项，进入求解器，选择【Analysis Type】>【New Analysis】，弹出分析类型选择对话框，选择分析类型为【Static】，单击【OK】按钮退出。

(2) 设置位移边界条件。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Displacement】>【On Nodes】，弹出“Apply U, ROT on Nodes”节点拾取对话框，用鼠标在图形显示区域选中位移桩腿底端节点和所有非线性弹簧模型右边的节点，单击【OK】按钮，在“DOFs to be constrained”中选择【ALL DOF】，单击【OK】按钮退出。

命令流如下：

```
/SOLU           ! 进入求解计算模块
ANTYPE, 0       ! 设置求解类型为静力分析
NSEL, S, NODE,, 64, 85, 1 ! 选中 64 ~ 85 节点
D, ALL, ALL     ! 约束其全部自由度
ALLSEL         ! 重新选中所有对象
```

(3) 施加载荷。

① 定义风载荷。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>

【Force/Moment】>【On Nodes】，弹出“Apply F/M on Nodes”对象拾取对话框，选择【Box】，用鼠标在图形显示区域拾取节点1和16之间的所有节点，单击【OK】按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”属性值设置对话框，在【Direction of force/moment】中选择【FX】，在【Force/moment value】中输入“23288/16”（共16个节点），单击【OK】按钮退出。

②定义平台顶部载荷。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Force/Moment】>【On Nodes】，弹出“Apply F/M on Nodes”对象拾取对话框，用鼠标在图形显示区域拾取节点1，单击【OK】按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”属性值设置对话框，在【Direction of force/moment】中选择【FZ】，在【Force/moment value】中输入【-2E6】，单击【OK】按钮退出。

③定义重力场。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Inertia>Gravity】>【Global】，弹出“Apply (Gravitational) Acceleration”属性值设置对话框，在【ACELX】，【ACELY】，【ACELZ】中依次输入“0，0，9.8”，如图4.17所示。

由于波浪载荷已在“Water Table”中设置，至此，所有的载荷已设置完毕。

(4) 求解。

通过菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Solve】>【Current LS】，对问题进行求解。在求解结束后，弹出“Solution is done!”信息提示框，关闭。

单击【Main Menu】>【Finish】菜单项，退出求解计算模块。

施加载荷及求解部分命令流如下：

NSEL, S, NODE, , 1, 16, 1	! 选择坐标位移 Z=1 ~ 17 之间的所有节点
F, ALL, FX, 23288/16	! 施加风载荷 (X 正向)
ALLSEL	! 选中所有对象
F, 1, FZ, -2E6	! 施加井口压载
ACEL, 0, 0, 9.8	! 施加惯性力 (重力) 加速度
SOLVE	! 执行求解
SAVE	! 保存求解结果
FINISH	

(5) 静力结果分析。

①读入结果文件。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Read Results】，单击【Last Set】，读入最后一个子步的结果文件。

②绘制结构整体变形图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Deformed Shape】，在弹出的对话框中选择【Def shape only】，显示结构整体变形图，如图5.11所示。

③绘制结构节点位移等值线云图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Nodal Solu】，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，依次单击【Nodal Solution】

> **【DOF Solution】** > **【Displacement vector sum】**，单击 **【OK】** 按钮，显示如图 5.12 所示的结构节点位移等值线云图。从图中可以看出，结构发生最大位移的位置位于平台顶部，数值为 1.581m，由此可以看出，单腿平台在风浪流条件下顶部会产生巨大的横向位移。

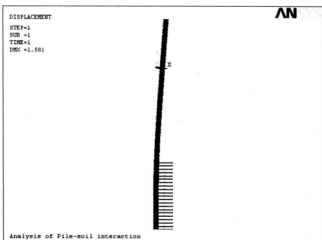


图 5.11 结构整体变形图

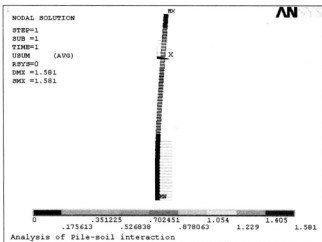


图 5.12 节点位移等值线云图

④绘制单元应力及应变等值线云图。

选择菜单路径 **【Main Menu】** > **【General Postproc】** > **【Plot Results】** > **【Contour Plot】** > **【Element Solu】**，弹出“Contour Element Solution Data”对话框，依次单击 **【Element Solution】** > **【Stress】** > **【von Mises stress】**，单击 **【OK】** 按钮，如图 5.13 所示显示结构的米塞斯等效应力云图。

③定义单元表项。

通过单元输出项所规定的规则（可以在 ANSYS 帮助系统中查看对应单元类型的输出规

则), 定义需要查看的结果项, 可以提取数据进行分析。下面进行单元等效应力及弯矩的定义。

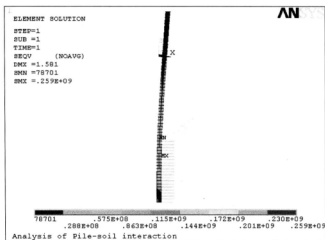


图 5.13 单元等效应力云图

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Element Table】>【Define Table】**, 弹出“Element Table Data”对话框, 单击 **【Add】** 按钮, 在弹出的对话框中 **【Lab】** 选项后的文本框中输入“MOMENT_I”, 定义单元 I 节点的弯矩, 在 **【Item, Comp】** 选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“SMISC,”, 接着在其下面的文本框中将内容补充为“SMISC, 5”, 单击 **【Apply】** 按钮, 继续在 **【Lab】** 选项后的文本框中输入“MOMENT_J”, 定义单元 J 节点的弯矩, 在 **【Item, Comp】** 选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“SMISC,”, 接着在其下面的文本框中将内容补充为“SMISC, 11”, 单击 **【Apply】** 按钮。

继续定义单元的等效应力, 弹出对话框的 **【Lab】** 选项后的文本框中输入“STRESS_I”, 定义单元 I 节点等效应力, 在 **【Item, Comp】** 选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“NMISC,”, 接着在其下面的文本框中将内容补充为“NMISC, 15”, 单击 **【Apply】** 按钮, 继续在 **【Lab】** 选项后的文本框中输入“STRESS_J”, 定义单元 J 节点的等效应力, 在 **【Item, Comp】** 选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“NMISC,”, 接着在其下面的文本框中将内容补充为“NMISC, 55”, 单击 **【OK】** 按钮退出。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Line Elem Res】**, 弹出“Plot Line-Element Results”对话框, 在 **【Lab】** 选项后的下拉列表选中“MOMENT_I”, 在 **【LabJ】** 选项后的下拉列表选中“MOMENT_J”, 其他选项默认, 单击 **【OK】** 按钮, 显示出如图 5.14 所示的单元弯矩分布云图。由图中可以看出, 结构最大弯矩出现在水面附近。

⑥列表显示所定义的单元表项。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Element Table】>【List Elem Table】**, 弹出如图 5.15 所示的对话框, 在右侧下拉列表框中选中“MOMENT_I, MOMENT_J, STRESS_I, STRESS_J”, 单击 **【OK】** 按钮, 节点力数据文件如表 5.2 所示。

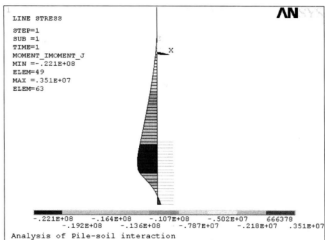


图 5.14 单元弯矩分布云图

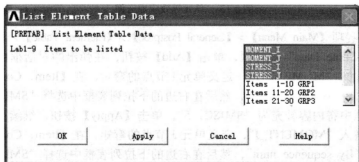


图 5.15 单元表项设置

表 5.2 选取单元弯矩及等效应力 单位: 弯矩 N·m, 应力 Pa

ELEM	MOMENT_I	MOMENT_J	STRESS_I	STRESS_J
43	-0.17973×10^8	-0.18720×10^8	0.21166×10^9	0.22011×10^9
44	-0.18720×10^8	-0.19466×10^8	0.22011×10^9	0.22861×10^9
45	-0.19466×10^8	-0.20206×10^8	0.22861×10^9	0.23704×10^9
46	-0.20206×10^8	-0.20919×10^8	0.23704×10^9	0.24517×10^9
47	-0.20919×10^8	-0.21544×10^8	0.24517×10^9	0.25231×10^9
48	-0.21544×10^8	-0.21980×10^8	0.25231×10^9	0.25731×10^9
49	-0.21980×10^8	-0.22094×10^8	0.25731×10^9	0.25868×10^9
50	-0.22094×10^8	-0.22080×10^8	0.25868×10^9	0.25859×10^9
51	-0.22080×10^8	-0.21928×10^8	0.25859×10^9	0.25696×10^9
52	-0.21928×10^8	-0.21632×10^8	0.25696×10^9	0.25369×10^9
53	-0.21632×10^8	-0.19846×10^8	0.25369×10^9	0.23360×10^9

续表

ELEM	MOMENT_I	MOMENT_J	STRESS_I	STRESS_J
54	-0.19846×10^6	-0.17012×10^6	0.23360×10^6	0.20165×10^6
55	-0.17012×10^6	-0.13671×10^6	0.20165×10^6	0.16398×10^6
56	-0.13671×10^6	-0.10362×10^6	0.16398×10^6	0.12668×10^6
57	-0.10362×10^6	-0.74925×10^7	0.12668×10^6	0.94341×10^6
58	-0.74925×10^7	-0.49201×10^7	0.94341×10^6	0.65358×10^6
59	-0.49201×10^7	-0.26916×10^7	0.65358×10^6	0.40259×10^6
60	-0.26916×10^7	-0.78057×10^6	0.40259×10^6	0.18747×10^6
61	-0.78057×10^6	0.87876×10^6	0.18747×10^6	0.17870×10^6
62	0.87876×10^6	0.22536×10^7	0.17870×10^6	0.15376×10^6
63	0.22536×10^7	0.35114×10^7	0.15376×10^6	0.29509×10^6

本部分的命令流如下:

```

/POST1      ! 进入通用后处理器
SET, LAST   ! 读入计算结果文件
/ESHAPE, 1.0 ! 打开模型线形状选项
PLDISP, 0    ! 绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1.0 ! 绘制结构位移等值图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0 ! 绘制结构等效应力分布云图
PLNSOL, EPTO, EQV, 0, 1.0 ! 绘制结构等效应变分布云图
ETABLE, MOMENT_I, SMISC, 5 ! 定义 I 端节点弯矩
ETABLE, MOMENT_J, SMISC, 11 ! 定义 J 端节点弯矩
ETABLE, STRESS_I, NMISC, 15 ! 定义 I 端节点等效应力
ETABLE, STRESS_J, NMISC, 55 ! 定义 J 端节点等效应力
PLLS, MOMENT_I, MOMENT_J, 1, 0 ! 绘制弯矩图
PRETAB, MOMENT_I, MOMENT_J, STRESS_I, STRESS_J ! 列表显示弯矩及应力值
FINISH

```

5.4.3 结构模态分析

(1) 模型修改。

打开 ANSYS 程序主界面, 导入静力分析时所建立的平台桩腿建模部分, 选择菜单路径 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Element Type】>【Add/Edit/Delete】**, 弹出 **【Element Type】** 对话框, 单击 **【Add】** 按钮, 定义 MASS21 为 4 号单元类型, 定义实常数 “R, 24,,, 2E5”。

选择菜单路径 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Elements】>【Elem Attributes】**, 弹出单元属性设置对话框, 选择单元类型为 “4 MASS21”, 实常数为 “24”, 其他默认, 单击 **【OK】** 退出。选择 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Elements】>【Auto Numbered】>【Thru Nodes】**, 弹出节点拾取对话框,

在图形显示区域中,用鼠标选中桩腿最顶端的节点,单击【OK】按钮,集中质量单元创建完成,模型修改完成。

本部分命令流如下:

```
ET, 4, MASS21      ! 定义 4 号单元类型为 MASS21
R, 24,, , 2E5      ! 定义 24 号实常数 (针对 MASS21 单元)
TYPE, 4            ! 选择 4 号单元类型
REAL, 24           ! 选择 24 号实常数
E, 1               ! 通过节点 1 建立 MASS21 实体单元
```

(2) 设置位移约束。

进行结构模态分析时,为了略去结构无关的振型,对平台桩腿所有节点只保留 X 和 ROTY 两个自由度。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Displacement】>【On Nodes】,弹出“Apply U, ROT on Nodes”节点拾取对话框,用鼠标在图形显示区域选中位移桩腿底端节点和所有非线性弹簧模型右边的节点,单击【OK】按钮,在“DOFs to be constrained”中选择【ALL DOF】,单击【Apply】按钮,继续选取其他所有节点,单击【OK】按钮,在“DOFs to be constrained”中选择【UY, UZ, ROTX, ROTZ】,单击【OK】按钮退出。

本部分命令流如下:

```
ALLSEL              ! 选中所有对象
NSEL, S, NODE,, 64, 85, 1 ! 选中 64 ~ 85 所有节点
D, ALL, ALL         ! 设置所选节点全部自由度
ALLSEL              ! 重新选中所有对象
D, 1, UY,, , 63, 1, UZ, ROTX, ROTZ ! 约束 1 ~ 63 号节点除 UX 和 ROTY 外的所有自由度
ALLSEL              ! 重新选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8     ! 施加重力载荷
```

(3) 设定模态分析类型。

重新进入 ANSYS 求解器,选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【New Analysis】,设置分析类型为【Modal】。

(4) 设置分析选项。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【Analysis Option】,弹出“Modal Analysis”对话框,模态提取方法采用【Block Lanczos】,提取模态数设为“6”。

(5) 扩展模态设置。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Load Step Opts】>【ExpansionPass】>【Single Expand】>【Expand Modes】,弹出“Expand Nodes”对话框,模态扩展数设为“6”。

(6) 模态分析求解。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Solve】>【Current LS】,弹出“Solve Current Load Step”对话框,单击【OK】,开始计算模态解。求解完毕后,在“Note”窗

口显示“Solution is done !”，单击【Close】关闭窗口。

模态分析设置部分命令流如下：

```
/SOLU          ! 进入求解模块
ANTYPE, MODAL  ! 设置分析类型为模态分析
MODEOPT, LANB, 6 ! 模态分析选项
MXPAND, 6      ! 设置扩展 6 阶模态
SOLVE          ! 开始模态求解
SAVE           ! 保存求解结果
FINISH         ! 退出求解模块
```

(7) 观察模态分析结果。

① 观察模型固有频率。

进入通用后处理器 POST1，选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Results Summary】，观察模型的固有频率，结果如表 5.3 所示。

表 5.3 结构固有频率

振型	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
频率 (Hz)	0.4726	2.6982	7.1816	13.841	22.667	32.716

② 读入结果文件。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Read Results】>【First Set】，读入第 1 载荷子步的计算结果。

③ 观察模态振型。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Deformed Shape】，显示一阶模态振型，如图 5.16 所示。

为了便于观察，建议选择菜单路径项【Utility Menu】>【PlotCtrls】>【Style】>【Size and Shape】，在“Size and Shape”对话框打开“Display of element shapes based on real constant descriptions”选项，以便在图形对话框以单元实际截面形状显示模型的模态振型。

重复上述操作可以得出其他五阶模态振型，如图 5.17 ~ 5.21 所示。

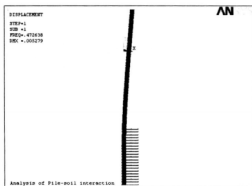


图 5.16 一阶模态

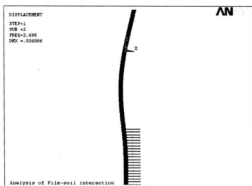


图 5.17 二阶模态

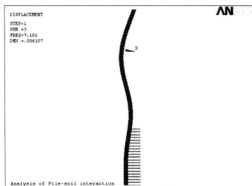


图 5.18 三阶模态

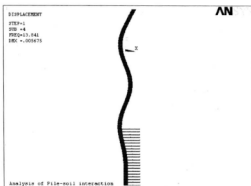


图 5.19 四阶模态

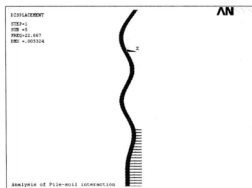


图 5.20 五阶模态

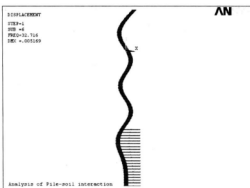


图 5.21 六阶模态

模态分析后处理部分命令流如下:

```

/POST1      ! 进入通用后处理器
ESHape, 1,0 ! 打开结构形状开关
SET, LIST   ! 列表显示结构自振频率计算结果
SET, FIRST  ! 读入一阶模态
PLDISP, 0   ! 显示结构一阶模态
SET, NEXT   ! 读入二阶模态
PLDISP, 0   ! 显示结构二阶模态
SET, NEXT   ! 读入三阶模态
PLDISP, 0   ! 显示结构三阶模态
SET, NEXT   ! 读入四阶模态
PLDISP, 0   ! 显示结构四阶模态
SET, NEXT   ! 读入五阶模态
PLDISP, 0   ! 显示结构五阶模态
SET, NEXT   ! 读入六阶模态
PLDISP, 0   ! 显示结构六阶模态
FINISH      ! 退出后处理模块
  
```

5.5 本章小结

本章主要介绍了桩土相互作用的非线性模拟。首先介绍了有关桩土相互作用问题的基本描述,接着介绍了目前常用的 $P-y$ 曲线理论,然后结合工程实例详细介绍了桩土相互作用的非线性有限元模拟过程,对结构进行了静力分析和模态分析。通过本章的学习,读者可以掌握桩土相互作用的 ANSYS 模拟以及模态分析的基本过程。

附录:本章实例 APDL 建模及分析命令流

```
!*****
!***** 平台桩土相互作用分析命令流 *****
!*****

/FILNAME, Drilling riser_1, 1 !设置工作文件名
/TITLE, Analysis of Drilling riser_1 !设置图形显示区域名
!***** 定义环境载荷参数
Dwater=28 !水深
H_wave=13.8 !波高
T_wave=10 !波周期
V_surface=1.73 !水面处海流速度
V_middle=1.37 !中部海流速度
V_bottom=0.95 !底部海流速度
! ***** 定义导管参数
OD=1.524 !导管外径
TW=0.054 !导管壁厚
!***** 定义桩顶载及风载
F_top=-2e6 !井口压载
F_wind= 23288 !风载荷
!***** 前处理过程
/PREP7 !进入前处理
ET, 1, PIPE16 !定义1号单元类型
ET, 2, PIPE59 !定义2号单元类型
ET, 3, COMBIN39 !定义3号单元类型
R, 1, OD, TW !设置1号实常数(针对 PIPE16 单元)
R, 2, OD, TW, 0.7, 2.0, 1030, 0, !设置2号实常数(针对 PIPE59 单元)
!***** 以下定义3~23号实常数(针对 COMBIN39 单元)
R, 3, 0, 0, 0.001524, 1050.756, 0.006096, 1751.26
RMORE, 0.024384, 2626.89, 0.06096, 3677.646, 0.12192, 4553.276
RMORE, 0.18288, 5253.78, 0.48768, 3152.268, 0.914146, 0
RMORE, 1.218946, 0, , , ,
R, 4, 0, 0, 0.01524, 3677.646, 0.06096, 5954.284
RMORE, 0.24384, 9456.804, 0.6096, 12784.198, 1.2192, 16111.592
RMORE, 1.8288, 18563.356, 4.8768, 13659.828, 9.14146, 7005.04
RMORE, 12.18946, 7005.04, , , ,
R, 5, 0, 0, 0.000762, 5253.78, 0.001778, 10507.56
```

RMORE, 0.002794, 15761.34, 0.003556, 18213.104, 0.004318, 20839.994
RMORE, 0.005842, 23466.884, 0.007366, 24867.892, 0.010414, 25918.648
RMORE, 1.218946, 26093.774,,,,,
R, 6, 0, 0, 0.00127, 17862.852, 0.002794, 35725.704
RMORE, 0.004826, 53588.556, 0.005842, 62344.856, 0.00762, 71276.282
RMORE, 0.01016, 80207.708, 0.012446, 84760.984, 0.018034, 88263.504
RMORE, 1.218946, 89139.134,,,,,
R, 7, 0, 0, 0.002032, 38177.468, 0.004064, 76354.936
RMORE, 0.006604, 114357.278, 0.008128, 133446.012, 0.010414, 152534.746
RMORE, 0.01397, 171623.48, 0.017272, 181080.284, 0.025146, 188785.828
RMORE, 1.218946, 190712.214,,,,,
R, 8, 0, 0, 0.00254, 64971.746, 0.00508, 130118.618
RMORE, 0.008382, 195090.364, 0.010414, 227663.8, 0.013208, 260062.11
RMORE, 0.01778, 292635.546, 0.022098, 308922.264, 0.03175, 321881.588
RMORE, 1.218946, 325033.856,,,,,
R, 9, 0, 0, 0.000762, 36251.082, 0.003048, 57441.328
RMORE, 0.012192, 91240.646, 0.03048, 123814.082, 0.06096, 156037.266
RMORE, 0.09144, 178628.52, 0.24384, 158138.778, 0.4572, 129242.988
RMORE, 0.6096, 129242.988,,,,,
R, 10, 0, 0, 0.000762, 43431.248, 0.003048, 68999.644
RMORE, 0.012192, 109628.876, 0.03048, 148681.974, 0.06096, 187384.82
RMORE, 0.09144, 214529.35, 0.24384, 199118.262, 0.4572, 177752.89
RMORE, 0.6096, 177752.89,,,,,
R, 11, 0, 0, 0.000762, 52537.8, 0.003048, 83359.976
RMORE, 0.012192, 132395.256, 0.03048, 179679.276, 0.06096, 226262.792
RMORE, 0.09144, 259011.354, 0.24384, 253232.196, 0.4572, 245001.274
RMORE, 0.6096, 245001.274,,,,,
R, 12, 0, 0, 0.002032, 388604.594, 0.004318, 777034.062
RMORE, 0.007112, 1165638.656, 0.00889, 1359853.39, 0.011176, 1554243.25
RMORE, 0.01524, 1748457.984, 0.018796, 1845477.788, 0.027178, 1923233.732
RMORE, 1.218946, 1942672.718,,,,,
R, 13, 0, 0, 0.002286, 473015.326, 0.004826, 946030.652
RMORE, 0.007874, 1419045.978, 0.009906, 1655466.078, 0.012446, 1892061.304
RMORE, 0.016764, 2128481.404, 0.020828, 2246691.454, 0.029972, 2341259.494
RMORE, 1.218946, 2364901.504,,,,,
R, 14, 0, 0, 0.00254, 622222.678, 0.005588, 1244620.482
RMORE, 0.009144, 1866843.16, 0.011176, 2178042.062, 0.014224, 2489240.964
RMORE, 0.01905, 2800439.866, 0.023876, 2955951.754, 0.034544, 3080466.34
RMORE, 1.218946, 3111463.642,,,,,
R, 15, 0, 0, 0.003302, 925015.532, 0.006858, 1850206.19
RMORE, 0.010922, 2775221.722, 0.013716, 3237729.488, 0.017526, 3700237.254
RMORE, 0.023368, 4162920.146, 0.02921, 4394086.466, 0.042164, 4579194.648
RMORE, 1.218946, 4625427.912,,,,,
R, 16, 0, 0, 0.003556, 1173694.452, 0.00762, 2347564.03
RMORE, 0.012446, 3521258.482, 0.015494, 4108105.708, 0.019558, 4695128.06
RMORE, 0.026416, 5281975.286, 0.032766, 5575311.336, 0.047498, 5810155.302

```

RMORE, 1.218946, 5868822.512, ...,
R, 17, 0, 0, 0.004826, 771079.778, 0.009906, 1541984.43
RMORE, 0.016256, 2313064.208, 0.02032, 2698516.534, 0.025908, 3083968.86
RMORE, 0.034544, 3469596.312, 0.042926, 3662234.912, 0.06223, 3816520.918
RMORE, 1.218946, 3855048.638, ...,
R, 18, 0, 0, 0.00508, 928868.304, 0.010922, 1857911.734
RMORE, 0.01778, 2786780.038, 0.022098, 3251214.19, 0.028194, 3715648.342
RMORE, 0.037592, 4180082.494, 0.04699, 4412474.696, 0.067818, 4598108.256
RMORE, 1.218946, 4644691.772, ...,
R, 19, 0, 0, 0.00508, 1017657.186, 0.010922, 2035489.498
RMORE, 0.01778, 3053146.684, 0.022098, 3562062.84, 0.028194, 4070978.996
RMORE, 0.037592, 4579720.026, 0.04699, 4834178.104, 0.067818, 5037674.516
RMORE, 1.218946, 5088636.182, ...,
R, 20, 0, 0, 0.00508, 1133765.724, 0.010922, 2267531.448
RMORE, 0.01778, 3401122.046, 0.022098, 3968004.908, 0.028194, 4534887.77
RMORE, 0.037592, 5101770.632, 0.04699, 5385299.626, 0.067818, 5611912.67
RMORE, 1.218946, 5668653.494, ...,
R, 21, 0, 0, 0.004826, 2153874.674, 0.01016, 4307749.348
RMORE, 0.01651, 6461624.022, 0.020828, 7538473.796, 0.026416, 8615498.696
RMORE, 0.035306, 9692348.47, 0.043942, 10230860.92, 0.0635, 10661670.88
RMORE, 1.218946, 10769373.37, ...,
R, 22, 0, 0, 0.004826, 2413586.532, 0.01016, 4826997.938
RMORE, 0.01651, 7240584.47, 0.020828, 8447377.736, 0.026416, 9654171.002
RMORE, 0.035306, 10860964.27, 0.043942, 11464273.34, 0.0635, 11946920.59
RMORE, 1.218946, 12067582.41, ...,
R, 23, 0, 0, 0.004826, 2662790.83, 0.01016, 5325581.66
RMORE, 0.01651, 7988372.49, 0.020828, 9319855.468, 0.026416, 10651338.45
RMORE, 0.035306, 11982646.3, 0.043942, 12648300.22, 0.0635, 13181033.52
RMORE, 1.218946, 13314129.28, ...,
!***** 设置材料参数
MP, EX, 1, 2.1E11      ! 设置弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3      ! 设置泊松比
MP, DENS, 1, 7850      ! 设置密度
!***** 设置环境载荷参数
TBDE, WATE, 1          ! 设置波流参数 Water Table
TB, WATE, 1, , 0       ! Water Table
TBMODIF, 1, 1, 2       ! 选择 Stokes 五阶波理论
TBMODIF, 1, 2, 0       ! 波流耦合作用方式
TBMODIF, 1, 3, Dwater  ! 定义水深
TBMODIF, 1, 4, 1030    ! 海水密度
TBMODIF, 1, 5, 0       ! 波浪作用方向
TBMODIF, 2, 1, -Dwater  ! 底部坐标
TBMODIF, 2, 2, V_bottom ! 底部流速
TBMODIF, 2, 3, 0       ! 底部海流作用方向
TBMODIF, 2, 4, -Dwater/2 ! 中部坐标
TBMODIF, 2, 5, V_middle ! 中部流速

```

```

TBMODIF, 2, 6, 0          ! 中部海流作用方向
TBMODIF, 3, 1, 0          ! 水面坐标
TBMODIF, 3, 2, V_surface  ! 海面流速
TBMODIF, 3, 3, 0          ! 表面海流作用方向
TBMODIF, 14, 1, H_wave    ! 波高
TBMODIF, 14, 2, T_wave    ! 波周期
TBMODIF, 14, 3, 41        ! 波浪相位角
!***** 建立几何模型
N, 1, 0, 0, 15            ! 建立 1 号节点
N, 44, 0, 0, -28          ! 建立 44 号节点
FILL                      ! 在节点 1 和 44 之间自动插人生成 2 ~ 43 节点
N, 64, 0, 0, -48          ! 建立 64 号节点
FILL                      ! 在节点 44 和 64 之间自动插人生成 45 ~ 63 节点
N, 65, 1, 0, -28         ! 建立 65 号节点
N, 85, 1, 0, -48         ! 建立 85 号节点
FILL                      ! 在节点 65 和 85 之间自动插人生成 66 ~ 84 节点
TYPE, 2                   ! 选择 2 号单元类型
REAL, 2                   ! 选择 2 号实常数
MAT, 1                    ! 选择 1 号材料模型
*DO, I, 1, 43, 1
E, I, I+1                 ! 泥线以上 PIPE59 单元
*ENDDO
TYPE, 1                   ! 选择 1 号单元类型
REAL, 1                   ! 选择 1 号实常数
MAT, 1                    ! 选择 1 号材料模型
*DO, I, 44, 63, 1
E, I, I+1                 ! 泥线以下 PIPE16 单元
*ENDDO
TYPE, 3                   ! 选择 3 号单元类型
*DO, I, 3, 23, 1
REAL, I                   ! 选择 I 号实常数
E, I+41, I+62             ! 非线性弹簧单元
*ENDDO
!***** 求解模块
/SOLU                     ! 进入求解计算模块
ANTYPE, 0                 ! 设置求解类型为静力分析
NSEL, S, NODE,, 64, 85, 1 ! 选中 64 ~ 85 节点
D, ALL, ALL               ! 约束其全部自由度
ALLSEL                    ! 重新选中所有对象
NSEL, S, NODE, , 1, 16, 1 ! 选择坐标位移 Z=1 ~ 17 之间的所有节点
F, ALL, FX, F_wind/16     ! 施加风载荷 (X 正向)
ALLSEL                    ! 选中所有对象
F, 1, FZ, F_top           ! 施加井口压载
ACEL, 0, 0, 9.8           ! 施加惯性力 (重力) 加速度
SOLVE                     ! 执行求解
SAVE                      ! 保存求解结果

```

FINISH

!***** 通用后处理过程

```

/POST1      ! 进入通用后处理器
SET, LAST   ! 读入计算结果文件
/ESHAPE, 1.0 ! 打开模型线形状选项
PLDISP, 0    ! 绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1.0      ! 绘制结构位移等值图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0     ! 绘制结构等效应力分布云图
PLNSOL, EPTO, EQV, 0, 1.0  ! 绘制结构等效应变分布云图
ETABLE, MOMENT_I, SMISC, 5  ! 定义 I 端节点弯矩
ETABLE, MOMENT_J, SMISC, 11 ! 定义 J 端节点弯矩
ETABLE, STRESS_I, NMISC, 15 ! 定义 I 端节点等效应力
ETABLE, STRESS_J, NMISC, 55 ! 定义 J 端节点等效应力
PLLS, MOMENT_I, MOMENT_J, 1, 0 ! 绘制弯矩图
PRETAB, MOMENT_I, MOMENT_J, STRESS_I, STRESS_J      ! 列表显示弯矩及应力值
FINISH

```

!***** 模态分析部分

```

/PREP7
ET, 4, MASS21      ! 定义 4 号单元类型为 MASS21
R, 24,, 2E5        ! 定义 24 号实常数 (针对 MASS21 单元)
TYPE, 4            ! 选择 4 号单元类型
REAL, 24           ! 选择 24 号实常数
E, 1               ! 通过节点 1 建立 MASS21 实体单元
ALLSEL            ! 选中所有对象
NSEL, S, NODE,, 64, 85, 1      ! 选中 64 ~ 85 所有节点
D, ALL, ALL        ! 设置所选节点全部自由度
ALLSEL            ! 重新选中所有对象
D, 1, UY,, 63, 1, UZ, ROTX, ROTZ ! 约束 1 ~ 63 号节点除 UX 和 ROTY 外的所有自由度
ALLSEL            ! 重新选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8    ! 施加重力载荷
/SOLU              ! 进入求解模块
ANTYPE, MODAL      ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT, LANB, 6    ! 模态分析选项
MXPAND, 6          ! 设置扩展 6 阶模态
SOLVE              ! 开始模态求解
SAVE               ! 保存求解结果
FINISH             ! 退出求解模块
/POST1             ! 进入通用后处理器
/ESHAPE, 1.0       ! 打开结构形状开关
SET, LIST          ! 列表显示结构自振频率计算结果
SET, FIRST         ! 读入一阶模态
PLDISP, 0          ! 显示结构一阶模态
SET, NEXT          ! 读入二阶模态
PLDISP, 0          ! 显示结构二阶模态
SET, NEXT          ! 读入三阶模态
PLDISP, 0          ! 显示结构三阶模态

```


SET, NEXT	! 读入四阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构四阶模态
SET, NEXT	! 读入五阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构五阶模态
SET, NEXT	! 读入六阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构六阶模态
FINISH	! 退出后处理模块

6 隔水导管抗冰极限承载力分析

◇ 本章导读

本章将对钢混组合结构用于海洋钻井隔水导管抗冰力学性能展开分析,介绍 ANSYS 进行弹性结构分析的一些基本问题,并结合工程实例详细介绍其操作过程。

本章主要包括如下两个内容:

- 组合隔水导管结构概述。
- 工程实例:隔水导管抗冰极限承载力弹性分析。

6.1 隔水导管结构概述

由于我国海岸线漫长,渤海湾等地区的油田冬季会出现一定的冰期。冰载荷的作用对于钻井作业会产生很大的影响,尤其是对于隔水导管的稳定性和强度提出了更高的要求。通常采用的单根钢管形式的隔水导管不利于抵抗冰载荷。由于组合结构具有很大的优势,因此可以尝试利用组合结构来解决海上钻井隔水导管的所遇到的冰载荷问题。

采用双圆夹层钢管及水泥浆的组合结构型式隔水导管,基本结构是在隔水导管的内外管之间灌注一定高度的固井用的水泥浆,其水泥浆灌注高度可以根据计算而优化确定,如图 6.1 所示。

6.2 工程实例:隔水导管抗冰极限承载力弹性分析

根据渤海某油田的实际工程情况,研究本海域冰载荷对钻井隔水导管强度和稳定性影响规律,组合导管的基本形状如图 6.2 所示。

基本参数如下:

内外管尺寸:

外管:外径 24in,壁厚 1in。

内管:外径 13.375in,壁厚 10.9mm。

材料参数:

水泥浆:弹性模量 3.0E10Pa,泊松比 0.2,极限抗压强度 27MPa。

钢管:弹性模量 2.1E11Pa,泊松比 0.3。

外管材质: X52 钢,屈服强度 360MPa。

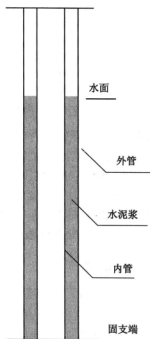


图 6.1 组合隔水导管结构示意图

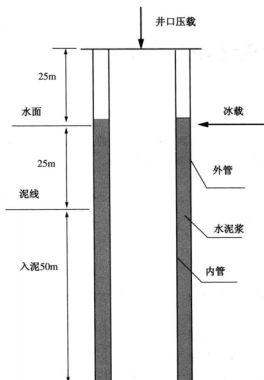


图 6.2 组合隔水导管

内管材质: J55 钢, 屈服强度 379MPa。

环境参数:

水深 25m, 海面以上高度 25m, 入泥深度 50m。

井口压载: 30t。

6.2.1 模型简化

对原模型进行简化, 以便建立有限元模型进行计算。简化的内容包括边界条件、海冰载荷及钢管与水泥浆之间的相互关系。

管顶处内外钢管之间安置夹具, 保持管顶内外钢管的相对位置不变。导管线管顶水平位移由浮力器控制, 最大水平位移为 h_{in} , 即水平位移达到该值时, 浮力器自动提供约束, 限制导管顶端继续发生水平位移。计算时取 h_{in} 为 0.2m 进行处理。有限元计算中, 第一步施加的载荷即包括使管顶产生 h_{in} 的水平位移以此模拟管顶的实际边界。管底部边界条件简化为泥线以下 5m 处为固支。

海冰载荷按照相关理论简化为均布载荷。ANSYS 计算中, 为便于进行参数分析,

在海水面处对导管进行位移加载, 得出相应的反力, 以此推算出等效冰载荷的大小, 求得其结构的极限抗冰承载力。

对于钢管与水泥浆的节点进行耦合, 不考虑二者之间的滑移, 水泥浆灌注高度为水面处。水泥浆应力—应变关系曲线采用 Hognestad 模型, 在 ANSYS 中采用多线性等向强化 (MISO) 曲线来描述这一关系。

下面按照 ANSYS 操作的先后顺序, 对建模和分析过程的步骤进行详细介绍。

6.2.2 前处理

(1) 设置工作环境。

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后, 单击 **【Utility Menu】 > 【File】 > 【Change Jobname】**, 指定分析的工作名称为 “Drilling_mixstructural”, 将 “New log and error files?” 选项设置为 **【yes】**, 单击 **【OK】** 按钮, 通过菜单路径项 **【Utility Menu】 > 【File】 > 【Change Title】**, 指定图形显示区域的标题为 “Analysis of Drilling_mixstructural”。

此部分的命令流为:

```
/FILENAME, Drilling_mixstructural, 1
/TITLE, Analysis of Drilling_mixstructural
```

(2) 定义单元类型。

设置完成后, 单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】** 进入前处理器 PREP7 开始建模以及其他的前处理操作。单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 >**

【Element Type】>【Add/Edit/Delete】，弹出“【Element Type】”对话框，单击【Add】按钮，弹出如图 6.3 所示的对话框，在下拉列表框中，选择“Shell”>“Plastic 4node 43”，单击【Apply】按钮，继续定义 SOLID45 单元。

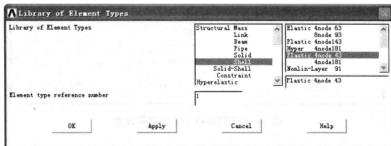


图 6.3 定义单元类型

此部分的命令流为：

```
/PREP7           ! 进入前处理器
ET, 1, SOLID45    ! 定义 1 号单元 SOLID45
ET, 2, SHELL43    ! 定义 2 号单元 SHELL43
```

(3) 设置单元实常数。

单击菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Real Constants】>【Add/Edit/Delete】，弹出【Element Type for Real Constants】对话框，单击【Add】按钮，选择“Type 1 SHELL43”，单击【OK】按钮。弹出如图 6.4 所示的对话框，在【Shell thickness at I, J, K, L】后的文本框中全部输入“1*0.0254”，如图 6.5 所示，单击【Apply】按钮，然后在【Real Constant Set No.】后的文本框中输入“2”，在【Shell thickness at I, J, K, L】后的文本框中全部输入“10.9E-3”。单击【OK】按钮退出实常数设置菜单路径。

此部分的命令流为：

```
R, 1, 0.0254
R, 2, 0.0109
```

(4) 设置材料模型参数及塑性选项。

① 水泥浆材料参数设置。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Material Props】>【Material Models】，弹出“Define Material Model Behavior”对话框，在对话框的右侧，依次单击【Structural】>【Linear】>【Elastic】>【Isotropic】，弹出弹性模量及泊松比设置对话框，在【EX】选项后的文本框中输入“3.0E10”，在【PRXY】选项后的文本框中输入“0.2”。然后如图 6.5 所示依次单击【Structural】>【Nonlinear】>【Inelastic】>【Rate Independent】>【Isotropic Mardening Plasticity】>【Mises Plasticity】>【Multilinear】，弹出“Stress-Strain”数据输入对话框，按图 6.6 所示输入数据，单击【Grahp】按钮，显示水泥浆应力应变曲线，如图 6.7 所示。再次单击【Structural】>【Density】，弹出密度设置对话框，在【DENS】选项后的文本框中输入“2000”。

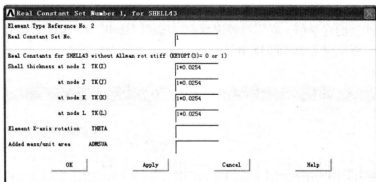


图 6.4 SHELL43 单元实常数设置

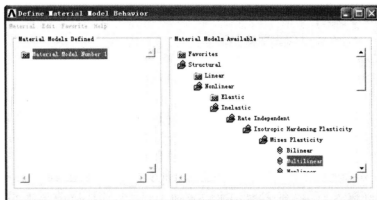


图 6.5 水泥浆材料模型设置

② 外管材料参数设置。

返回“Define Material Model Behavior”对话框，依次单击菜单路径项 **【Material】** > **【New Model】**，弹出材料参数编号对话框，设置编号为“2”，单击 **【OK】**，再次选择菜单路径项 **【Structural】** > **【Nonlinear】** > **【Inelastic】** > **【Rate Independent】** > **【Isotropic Hardening Plasticity】** > **【Mises Plasticity】** > **【Bilinear】**，弹出“Note”对话框，单击 **【确定】** 按钮，设置材料的线性阶段的弹性模量及泊松比，在出现的对话框 **【EX】** 项后的文本框中输入“2.1E11”，在 **【PRXY】** 项后的文本框中输入“0.3”。然后单击 **【OK】** 按钮，弹出如图 6.8 所示的材料屈服强度设置对话框，在 **【Yield Stss】** 项后的文本框中输入“360E6”，在 **【Tang Mod】** 项后的文本框中输入“0”，表示采用的材料为理想弹塑性模型。单击 **【Graph】** 按钮，图形显示界面立即显示所设置的材料模型曲线，如图 6.9 所示。再次单击 **【Structural】** > **【Density】**，弹出密度设置对话框，在 **【DENS】** 选项后的文本框中输入“7850”。

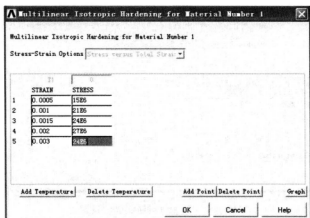


图 6.6 水泥浆材料应力应变值设置

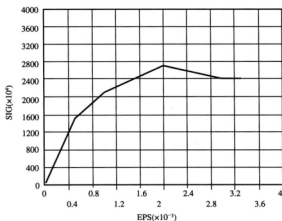


图 6.7 水泥浆材料应力应变曲线

③内管材料参数设置。

返回“Define Material Model Behavior”对话框，依次单击菜单路径项【Material】>【New Model】，弹出材料参数编号对话框，设置编号为“3”，单击【OK】，再依次选择菜单路径项【Structural】>【Nonlinear】>【Inelastic】>【Rate Independent】>【Isotropic Hardening Plasticity】>【Mises Plasticity】>【Bilinear】，弹出“Note”对话框，单击【确定】按钮，设置材料的线性阶段的弹性模量及泊松比，在出现的对话框【EX】项后的文本框中输入“2.1E11”，在【PRXY】项后的文本框中输入“0.3”。然后单击【OK】按钮，弹出如图 6.8 所示的材料屈服强度设置对话框，在【Yield Stss】项后的文本框中输入“379E6”，在【Tang Mod】项后的文本框中输入“0”，再次单击【Structural】>【Density】，弹出密度设置对话框，在【DENS】选项后的文本框中输入“7850”。

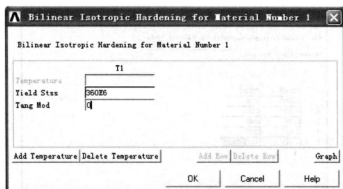


图 6.8 钢管材料屈服强度设置

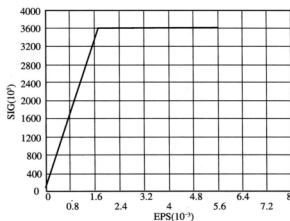


图 6.9 钢管材料的理想弹塑性模型

至此，所有的材料参数已设置完成，其结果如图 6.10 所示。

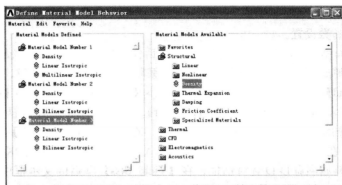


图 6.10 设置完后的材料参数

此部分的命令流为：

```
MP, EX, 1, 3E10          ! 水泥材料浆参数设置编号为 1
MP, PRXY, 1, 0.2
MP, DENS, 1, 2000
TB, MISO, 1, 1, 5,      ! 塑性设置
TBTEMP, 0               ! 水泥浆应力应变设置编号为 2
TBPT,, 0.0005, 15E6
TBPT,, 0.001, 21E6
TBPT,, 0.0015, 24E6
TBPT,, 0.002, 27E6
TBPT,, 0.003, 24E6
MP, EX, 2, 2.1E11        ! 外管材料参数设置
MP, PRXY, 2, 0.3
MP, DENS, 2, 7850
TB, BKIN, 2, 1          ! 塑性设置
TBTEMP, 0
TBDATA, 1, 360E6, 0      ! 屈服强度设置
MP, EX, 3, 2.1E11        ! 内管材料参数设置编号为 3
MP, PRXY, 3, 0.3
MP, DENS, 3, 7850
TB, BKIN, 3, 1          ! 塑性设置
TBTEMP, 0
TBDATA, 1, 379E6, 0      ! 屈服强度设置
```

(5) 建立几何模型。

选择下拉菜单路径项 **【Workplane】>【Change Active CS to】>【Global Cylindrical】**，如图 6.11 所示，将坐标系设置为柱坐标。

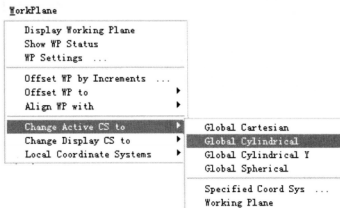


图 6.11 转换坐标系为柱坐标

①建立内外钢管几何模型：利用关键点建立线，再经过旋转成面。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Keypoints】>【In Active Cs】，按表 6.1 所示建立关键点。

表 6.1 关键点坐标

关键点编号	坐 标 (柱坐标系)		
	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0	0	55
3	0.3048	0	0
4	0.3048	0	30
5	0.3048	0	55
6	0.3048	180	0
7	0.3048	180	30
8	0.3048	180	55
9	0.3048	0	0
10	0.1698	0	30
11	0.1698	0	55
12	0.1698	180	0
13	0.1698	180	30
14	0.1698	180	55

注：表中 0.3048 对应外管半径 ($24 \times 0.0254/2$)，0.1698 对应于内管半径 ($13.375 \times 0.0254/2$)。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Lines】>【Straight Line】，弹出关键点拾取对话框，用鼠标在图形显示区域选取关键点 3 和 4，单击【Apply】按钮，继续选取关键点 4 和 5，6 和 7，7 和 8，9 和 10，10 和 11，12 和 13 以及 13 和 14。单击【OK】完成，结果如图 6.12 所示。打开下拉菜单路径【PlotCtrls】>【Numbering】，将【Line numbers】选项设置为【On】，显示所有线编号。

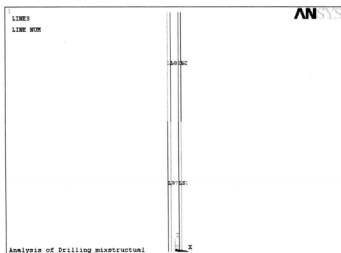


图 6.12 创建内外管线模型

②将线分段并旋转成面。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Size Cntrl】>【ManualSize】>【Lines】>【Picked Lines】，弹出线拾取对话框，用鼠标在图形显示区域选取所有的线，单击【OK】按钮，弹出“Element Sizes on Picked Lines”属性设置对话框，在【SIZE】选项后的文本框中输入“1”，表示线单元长度为1m，单击【OK】按钮退出。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Operate】>【Extrude】>【Lines】>【About Axis】进行旋转生成面操作，在弹出线拾取对话框中，用鼠标在图形显示区域选取线L1和L2，单击【OK】按钮，弹出轴线关键点选取对话框，用鼠标在图形显示区域选取位于轴线上的关键点1和2，单击【OK】按钮，弹出如图6.13所示的旋转属性设置对话框，在【Arc Length in degrees】后填“180”，即表示沿轴线旋转180°，生成一半的外管模型曲面。用相同方法将线L3和L4沿轴线旋转180°生成另外一半外管曲面，利用相同的方法生成内管曲面模型，结果如图6.14所示。

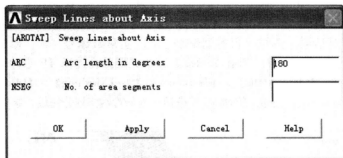


图 6.13 旋转属性设置

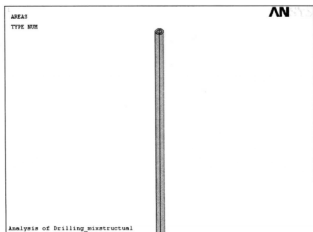


图 6.14 内外管曲面几何模型

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Size Cntrl】>【ManualSize】>【Lines】>【Picked Lines】，弹出线拾取对话框，用鼠标在图形显示区域选取Z轴方向上位于“Z=0, 30, 55”上所有的线，单击【OK】按钮，弹出“Element Sizes on Picked Lines”

属性设置对话框,在【NDIV】选项后的文本框中输入“3”,单击【OK】按钮退出。

③内外管有限元网格划分。

外管网格设置:

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】,弹出选择项的属性设置对话框,在第一个下拉菜单路径中选中“Areas”,第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“X coordinates”,在“Min, Max”方框中输入“0.3048”,单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh Attributes】>【All Areas】,弹出单元属性选择对话框,选择材料类型编号“2”,实常数编号“1”,单元类型编号“2, SHELL43”,单击【OK】按钮。单击【Select】下拉菜单路径选择“Everything”。

内管网格设置:

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】,弹出选择项的属性设置对话框,在第一个下拉菜单路径中选中“Areas”,第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“X coordinates”,在“Min, Max”方框中输入“0.1698”,单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh Attributes】>【All Areas】,弹出单元属性选择对话框,选择材料类型编号“3”,实常数编号“2”,单元类型编号“2, SHELL43”,单击【OK】按钮。单击【Select】下拉菜单路径选择【Everything】。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh】>【Areas】>【Free】,弹出面拾取对话框,单击【Pick All】按钮,内外管网格划分完成,结果如图 6.15 所示。

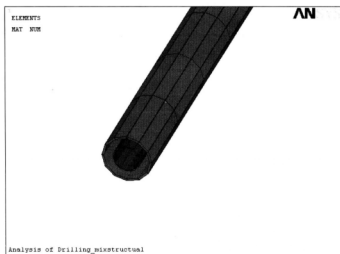


图 6.15 内外筒有限元模型图

④夹层水泥浆模型建立。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Volumes】>【Cylinder】>【Partial Cylinder】,弹出“Partial Cylinder”定义对话框,在【WP X】选项后的文本框中输入“0”,在【WP Y】选项后的文本框中输入“0”,在【Rad-1】选项后的文本框中输入“0.1698”,在【Theta-1】选项后的文本框中输入“0”,在【Rad-2】选项后的文本框中输入“0.3048”,在【Theta-2】选项后的文本框中输入“180”,在【Depth】选

项后的文本框中输入“30”，单击【Apply】按钮，继续建立另一半模型，在【WP X】选项后的文本框中输入“0”，在【WP Y】选项后的文本框中输入“0”，在【Rad-1】选项后的文本框中输入“0.1698”，在【Theta-1】选项后的文本框中输入“180”，在【Rad-2】选项后的文本框中输入“0.3048”，在【Theta-2】选项后的文本框中输入“360”，在【Depth】选项后的文本框中输入“30”，单击【OK】按钮退出。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Y coordinates”，在“Min, Max”方框中输入“0”，并选中【From Full】选项，单击【OK】按钮。重复单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Y coordinates”，在“Min, Max”方框中输入“180”，并选中【Also Select】选项，单击【OK】按钮。再次单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“X coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“0.1698”，并选中【Unselect】选项，单击【OK】按钮。再次单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“X coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“0.3048”，并选中【Unselect】选项，单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Size Cntrls】>【ManualSize】>【Lines】>【All Lines】，弹出“Element Size…”对话框，在【NDIV】选项后的文本框中输入“2”，单击【OK】按钮完成设置。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Everything】，再次单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“X coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“0.1698”，并选中【From Full】选项，单击【OK】按钮。重复单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“X coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“0.3048”，并选中【Also Select】选项，单击【OK】按钮。再次单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Y coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“0”，并选中【Unselect】选项，单击【OK】按钮。再次单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Y coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“180”，并选中【Unselect】选项，单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Size Cntrls】>【ManualSize】>【Lines】>【All Lines】，弹出“Element Size…”对话框，在【NDIV】选项后的文本框中输入“6”，单击【OK】按钮完成设置。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Everything】，再次单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Y coordinates”，在“Min, Max”文本

框中输入“0”，并选中【From Full】选项，单击【OK】按钮。重复单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Y coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“180”，并选中【Also Select】选项，单击【OK】按钮。再次单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Lines”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z coordinates”，在“Min, Max”方框中输“0, 30”，并选中【Reselect】选项，单击【OK】按钮退出。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Size Cntrl】>【ManualSize】>【Lines】>【All Lines】，弹出“Element Size…”对话框，在【SIZE】选项后的文本框中输入“1”，单击【OK】按钮完成设置。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Everything】，选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh Attributes】>【All Volumes】，弹出单元属性选择对话框，选择材料类型编号“1”，单元类型编号“1, SOLID45”，单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh】>【Volumes Sweep】>【Sweep】，弹出“Volume Sweeping”对象拾取对话框，选择【Pick All】按钮，网格划分完成。结果如图 6.16 所示。



图 6.16 建立完毕的内外筒有限元模型

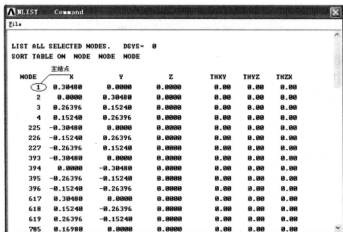
⑤节点耦合。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Elemnets”，第二个下拉菜单路径中选中“By Attributes”并选中“Material num”，在“Min, Max”文本框中输入“1”，单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Numbering Cntrl】>【Merge Items】，在弹出的对话框中的【Label】选项后的下拉列表中选择“Nodes”，单击【OK】按钮。单击【Select】下拉菜单路径选择【Everything】，选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Numbering Cntrl】>【Compress Nubers】，在弹出的对话框中的【Label】选项后的下拉列

表中选择“Nodes”，单击【Apply】按钮，继续选择“Elements”，单击【OK】按钮退出，在操作过程中，如出现警告提示，单击【确定】予以忽略即可。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z Location”，在“Min, Max”文本框中输入“1, 30”，单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Coupling/Ceqn】>【Coincident Nodes】默认弹出对话框的所有设置，单击【OK】按钮退出。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“0”，单击【OK】按钮。选择【List】>【Nodes】。弹出“Sort NODE Listing”选择对话框，选中“Coord.w/Angles”，单击【OK】按钮，如图 6.17 所示列表显示出所选节点的坐标信息。将节点“1”设置主节点（为后处理准备）。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Coupling/Ceqn】>【Couple DOFs】，弹出“Define Coupled DOFs”拾取对话框，直接单击【Pick All】按钮，弹出耦合自由度属性设置对话框，进行如图 6.18 所示的设置。然后单击【Select】下拉菜单路径选择【Everything】。



NODE	X	Y	Z	THXV	THVZ	THXZ
1	0.30400	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
2	0.0000	0.30400	0.0000	0.00	0.00	0.00
3	0.26376	0.15240	0.0000	0.00	0.00	0.00
4	0.15240	0.26376	0.0000	0.00	0.00	0.00
225	-0.30400	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
226	-0.15240	0.26376	0.0000	0.00	0.00	0.00
227	-0.26376	0.15240	0.0000	0.00	0.00	0.00
393	-0.30400	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
394	0.0000	-0.30400	0.0000	0.00	0.00	0.00
395	-0.26376	-0.15240	0.0000	0.00	0.00	0.00
396	-0.15240	-0.26376	0.0000	0.00	0.00	0.00
617	0.30400	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
618	0.15240	-0.26376	0.0000	0.00	0.00	0.00
619	0.26376	-0.15240	0.0000	0.00	0.00	0.00
795	0.16700	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00

图 6.17 列表显示节点信息

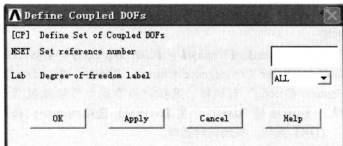


图 6.18 耦合自由度设置

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Finish】**，单击常用工具条上的 **【SAVE DB】** 按钮，保存有限元模型，退出前处理模块。

此建模部分的命令流见本章附录里的 APDL 部分。

6.2.3 求解计算

(1) 设置分析类型。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【New Analysis】**，弹出如图 6.19 所示分析类型选择对话框，选择 “Static”，单击 **【OK】** 按钮退出。

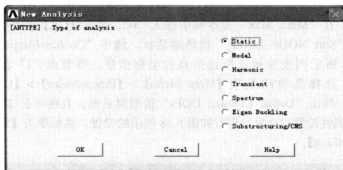


图 6.19 分析类型设置

(2) 设置求解选项。

首先通过菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Unbridged Menu】**，展开隐藏的菜单路径项目。选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【Analysis Options】**，在弹出的 “Static or Steady-State Analysis” 对话框中，对如下的分析选项进行设置。

① 打开大变形选项。

在 “Static or Steady-State Analysis” 对话框 “Nonlinear Option” 一栏的 **【NLGEOM】** 选项置为 **【On】** 状态。

② Newton-Raphson 选项。

在 “Static or Steady-State Analysis” 对话框 “Nonlinear Option” 一栏的 **【NROPT】** 选项中选择 “Full N-R”，自适应下降 “Adaptive descent” 下拉选项中选择 “On if necessary”。

③ 选择求解器。

在 “Static or Steady-State Analysis” 对话框的 **【EQSLV】** 选项中选择 “Equation solver” 为 “Sparse solver”。

④ 设置收敛准则。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Load Step Opts】 > 【Nonlinear】 > 【Convergence Crit】**，弹出 “Default Nonlinear Convergence Criteria” 列表框，单击 **【Replace】** 按钮，弹出 “Nonlinear Convergence Criteria” 对话框，选择收敛准则为位移收敛准则 “Displacement U”，在 **【TOLER】** 一栏中填写 “0.001”，在 **【NORM】** 选项列表中选择 “Infinite norm”。设置完成后，单击 **【OK】** 按钮，关闭该对话框。

⑤ 设置平衡迭代次数。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Load Step Opts】 > 【Nonlinear】 >**

【Equilibrium Iter】，弹出“Equilibrium Iterations”对话框，在文本框中输入“50”，单击【OK】按钮，关闭该对话框。

⑥打开预测选项。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Load Step Opts】>【Nonlinear】>【Predictor】，弹出“Predictor”对话框，在选项列表中选择“On for all sbstp”，单击【OK】按钮，关闭该对话框。

⑦结果文件输出设置。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Load Step Opts】>【Output Ctrl】>【DB/Result File】，弹出“Controls for Database and Results File Writing”对话框，在【Item】一栏中选择“All items”，在【FREQ】选项中，选择“Every Substep”，在【Cname】列表中，选中“All entities”。设置完成后，单击【OK】按钮，关闭该对话框。

(3) 定义边界条件。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Displacement】>【On Nodes】，弹出节点拾取对话框，直接在“List of Items”文本框中输入“1”，单击【OK】按钮，弹出自由度设置对话框，选择“All DOFs”，单击【OK】退出，施加约束之后的有限元模型如图 6.20 所示。

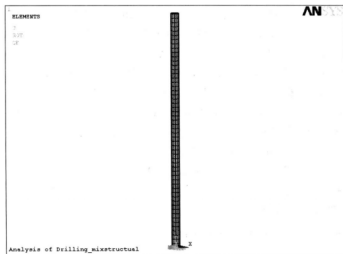


图 6.20 施加边界条件的有限元模型

(4) 施加载荷步。

载荷步 1：施加重力场载荷。

①设置载荷步选项。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【sol'n Controls】，弹出【Solution Controls】对话框，选择【Basic】标签，在“Time at end of loadstep”栏中输入“1.0”，其他选项接受默认设置，单击【OK】按钮，关闭【Solution Controls】。

②施加载荷。

单击菜单路径【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】

> **【Inertia】** > **【Gravity】** > **【Global】**，弹出“Apply (Gravitational) Acceleration”属性值设置对话框，在“ACELX, ACELY, ACELZ”中依次输入“0, 0, 9.8”。

③写入载荷步文件。

选择菜单路径**【Main Menu】** > **【Solution】** > **【Load Step Opts】**，弹出“Write Load Step File”对话框，在“Load step file number n”栏中输入“1”，单击**【OK】**。

载荷步 2：施加管顶集中载荷及位移载荷。

①设置载荷步选项。

选择菜单路径项**【Main Menu】** > **【Solution】** > **【Analysis Type】** > **【sol'n Controls】**，弹出“Solution Controls”对话框，选择**【Basic】**标签，在**【Time at end of loadstep】**栏中输入“2.0”，其他选项接受默认设置，单击**【OK】**按钮。

②施加载荷。

单击**【Select】**下拉菜单路径选择**【Entities】**，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“55”，并选中**【From Full】**选项，单击**【OK】**按钮。重复单击**【Select】**下拉菜单路径选择**【Entities】**，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“X coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“0.3048”，并选中**【ReSelect】**选项，单击**【OK】**按钮。选择菜单路径项**【Main Menu】** > **【Solution】** > **【Define Loads】** > **【Apply】** > **【Structural】** > **【Force/Moment】** > **【On Nodes】**，弹出节点拾取对话框，单击**【Pick All】**按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”属性值设置对话框，在“Direction of force/moment”中选择“Fz”，在“Force/moment value”中输入“-3E5/12”（总共 12 个节点），单击**【OK】**按钮。单击**【Select】**下拉菜单路径选择“Everything”。

单击**【Select】**下拉菜单路径选择**【Entities】**，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z coordinates”，在“Min, Max”文本框中输入“55”，单击**【OK】**按钮。选择菜单路径项**【Main Menu】** > **【Solution】** > **【Define Loads】** > **【Apply】** > **【Structural】** > **【Displacement】** > **【On Nodes】**，弹出节点拾取对话框，单击**【Pick All】**按钮，弹出位移值设置对话框，在**【Lab】**选项后的下拉列表框中选择选择“Ux”，在**【VALUE】**选项后的文本框中输入“0.1”，单击**【OK】**退出，单击**【Select】**下拉菜单路径选择“Everything”。

③写入载荷步文件。

选择菜单路径项**【Main Menu】** > **【Solution】** > **【Load Step Opts】**，弹出“Write Load Step File”对话框，在**【Load step file number n】**栏中输入“2”，单击**【OK】**退出。

载荷步 3：施加等效冰载荷。

①设置载荷步选项。

选择菜单路径项**【Main Menu】** > **【Solution】** > **【Analysis Type】** > **【sol' n Controls】**，弹出“Solution Controls”对话框，选择**【Basic】**标签，在**【Time at end of loadstep】**栏中输入“6.0”，其他选项接受默认设置，单击**【OK】**按钮，关闭**【Solution Controls】**。

②施加载荷。

由于本例的目的是为了求得结构的极限抗冰载荷。因此，可以在冰载作用位置施加相应的位移载荷，通过后处理作出相应的位移—反力曲线，即可求得结构的极限载荷。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，通过“Z Location”选择一组节点，输入“30”，即选择水面处的所有节点。单击菜单路径【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Displacement】>【On Nodes】，弹出节点拾取对话框，选择“Pick All”，弹出属性值设置对话框，设置“ux”为“2.0”，单击【OK】按钮退出，单击【Select】下拉菜单路径选择【Everything】。至此所有载荷已施加结束。

③写入载荷步文件。

选择菜单路径【Main Menu】>【Solution】>【Load Step Opts】，弹出“Write Load Step File”对话框，在【Load step file number n】栏中输入“6”，单击【OK】。

至此所有载荷步已施加完成。

(5) 求解载荷步。

通过菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Solve】>【From LS Files】，弹出“Solve Load Step Files”对话框，在【Starting LS File Number】栏中输入“1”，在【Ending LS File Number】栏中输入“4”，单击【OK】按钮对问题进行求解。在求解过程中会看到如图 6.21 所示的求解收敛曲线。在求解结束后，弹出“Solution is done!”信息提示框，关闭。单击【Main Menu】>【Finish】菜单路径项，退出求解计算模块。

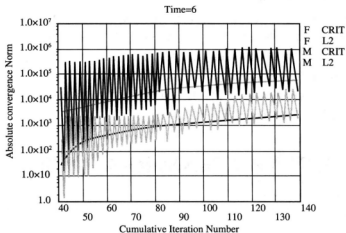


图 6.21 计算收敛曲线

此部分的命令流见本章附录里的 APDL 部分。

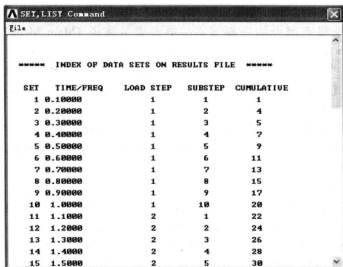
6.2.4 结果分析

在后处理模块中，有一般后处理器和时程处理器，由于本例的分析涉及时程问题，因此，将进行两种处理器的操作。

6.2.4.1 通用后处理器 POST1


通过单击菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Results Summary】，可以查看整个计算过程的子步数，如图 6.22 所示。

(1) 绘制结构变形图。



SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.10000	1	1	1
2	0.20000	1	2	4
3	0.30000	1	3	5
4	0.40000	1	4	7
5	0.50000	1	5	9
6	0.60000	1	6	11
7	0.70000	1	7	13
8	0.80000	1	8	15
9	0.90000	1	9	17
10	1.0000	1	10	20
11	1.1000	2	1	22
12	1.2000	2	2	24
13	1.3000	2	3	26
14	1.4000	2	4	28
15	1.5000	2	5	30

图 6.22 计算载荷步信息

通过菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Read Results】>【Last Set】**，将最后一个子步的计算结果读入通用后处理器。单击 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Deformed Shape】**，弹出如图 6.23 所示对话框，选中 **【Def shape only】**，单击 **【OK】**，通过常用下拉菜单 **【PlotCtrls】>【Style】>【Size and Shape】**，弹出如图 6.24 所示对话框，将 **【ESHAPE】** 选项设置为“On”，在 **【X distortion ratio】** 选项后的文本框中输入“2.5”，即将 X 方向的比例放大 2.5 倍，以便查看，单击 **【OK】** 按钮退出。选择主界面右侧  按钮，结构变形如图 6.25 所示。

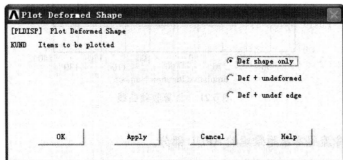


图 6.23 结构变形查看设置

(2) 绘制结构位移等值线图。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Nodal Solu】**，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，在 **【Item to be contoured】** 一栏中，依次单击 **【Nodal Solution】>【Displacment vector sum】**，在图形显示区域显示如图 6.26 所示的结构整体位移等值线图。

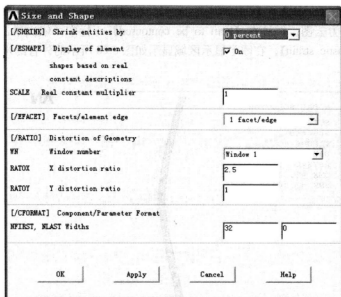


图 6.24 结构模型查看设置

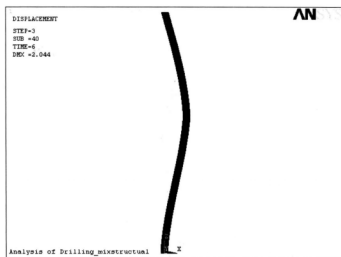


图 6.25 结构整体变形图

(3) 分别绘制内外管及水泥浆应力应变分布云图。

①绘制外管应力应变图。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选“Elements”，第二个下拉菜单路径中选“By Attributes”并选中“Mat num”，在“Min, Max”文本框中输入“2”，并选中【From Full】选项，单击【OK】按钮，选择菜单路径【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Nodal Solu】，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，在【Item to be contoured】

一栏中,依次单击【Stress】>【von Mises stress】,在图形显示区域显示如图 6.27 所示的外管的米塞斯等效应力云图。继续在【Item to be contoured】一栏中,依次单击【Plastic Strain】>【von Mises plastic strain】,在图形显示区域显示如图 6.28 所示的外管的米塞斯等效塑性应变云图。

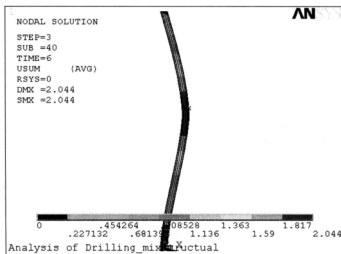


图 6.26 结构整体位移等值线图

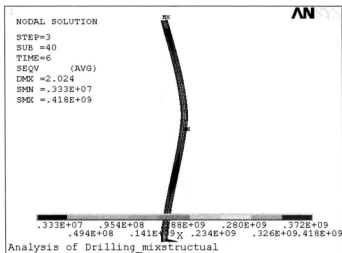


图 6.27 外管结构米塞斯等效应力分布云图

②绘制内管应力应变图。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】,弹出选择项的属性设置对话框,在第一个下拉菜单路径中选中“Elements”,第二个下拉菜单路径中选中“By Attributes”并选中“Mat num”,在“Min, Max”文本框中输入“3”,并选中【From Full】选项,单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Nodal Solu】,弹出

“Contour Nodal Solution Data”对话框,在【Item to be contoured】一栏中,依次单击【Stress】>【von Mises stress】,在图形显示区域显示如图 6.29 所示的内管的米塞斯等效应力云图。继续在【Item to be contoured】一栏中,依次单击【Plastic Strain】>【von Mises plastic strain】,在图形显示区域显示如图 6.30 所示的内管的米塞斯等效塑性应变云图。

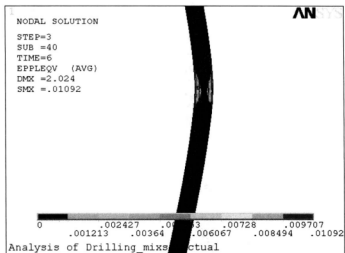


图 6.28 外管结构塑性应变分布图

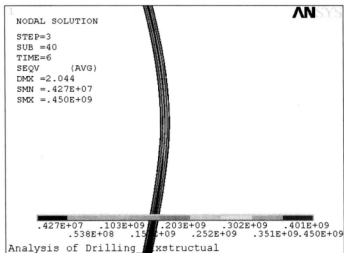


图 6.29 内管结构米塞斯等效应力分布云图

③绘制水泥浆应力应变图。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】,弹出选择项的属性设置对话框,在第一个下拉菜单路径中选“Elements”,第二个下拉菜单路径中选“By Attributes”并选中“Mat num”,在“Min, Max”文本框中输入“1”,并选中【From Full】选项,单击【OK】按钮。选择菜单路径【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Nodal Solu】,

弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，在【Item to be contoured】一栏中，依次单击【Stress】>【von Mises stress】，在图形显示区域显示如图 6.31 所示的水泥浆的米塞斯等效应力云图。继续在【Item to be contoured】一栏中，依次单击【Plastic Strain】>【von Mises plastic strain】，在图形显示区域显示如图 6.32 所示的水泥浆的米塞斯等效塑性应变云图。

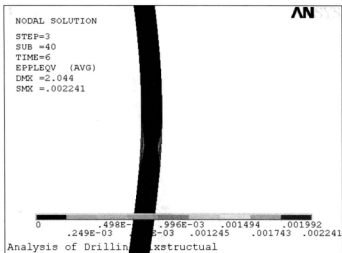


图 6.30 内管结构塑性应变分布图

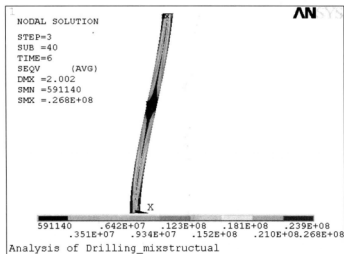


图 6.31 水泥浆结构米塞斯等效应力分布云图

④列表显示节点信息。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【List Results】>【Nodal Solution】，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，在【Item to be contoured】一栏中，依次单击【Nodal Solution】>【DOF Solution】>【Displacement vector sum】，可以列表显示节点的位移值，如图 6.33 所示。继续单击【Stress】>【von Mises stress】，可以列表显示米塞斯等效应力值，如图 6.34 所示。

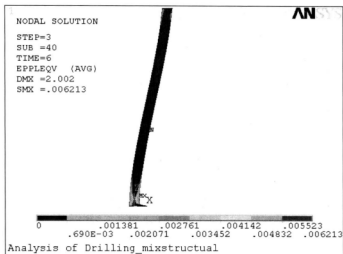


图 6.32 水泥浆结构塑性应变分布图

File

TIME= 6.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	UX	UY	UZ	USUM
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	2.0000	-0.61589E-04	-0.74833E-01	2.0014
6	0.89774E-02	0.55943E-04	-0.19976E-03	0.89779E-02
7	0.36911E-01	0.15537E-04	-0.74211E-03	0.36918E-01
8	0.78111E-01	0.56828E-05	-0.16692E-02	0.78129E-01
9	0.12714	0.93179E-05	-0.29194E-02	0.12717
10	0.18270	0.37226E-05	-0.45126E-02	0.18276
11	0.24392	0.56633E-05	-0.64248E-02	0.24401
12	0.31815	0.43392E-05	-0.86572E-02	0.31827
13	0.38885	0.42829E-05	-0.11195E-01	0.38182
14	0.45543	0.36749E-05	-0.14814E-01	0.45564
15	0.53333	0.34792E-05	-0.17886E-01	0.53368

图 6.33 节点位移值

显示结构反力:

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z Location”，在“Min, Max”文本框中输入“0”，并选中【From Full】选项，单击【OK】按钮。继续单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z Location”，在“Min, Max”文本框中输入“55”，并选中【Also Select】选项，单击【OK】按钮。选择菜单路径【Main Menu】>【General Postproc】>【List Results】>【Reaction Solu】，弹出“List Reaction Solution”对话框，在【Lab】选项右边的栏中选择【All items】，可以列表显示节点反力值如图 6.35 所示。

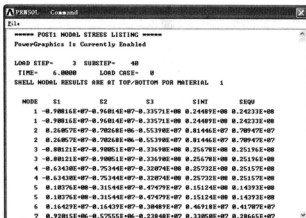


图 6.34 节点应力值

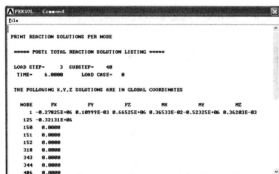


图 6.35 结构反力值

6.2.4.2 时间历程后处理器 POST26

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【TimeHist Postproc】**，进入时间历程后处理器。

(1) 定义时间历程后处理变量：位移变量。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【TimeHist Postproc】 > 【Define Variables】**，在弹出的如图 6.36 所示“Define Time-History”对话框中，单击 **【Add】** 按钮，出现如图 6.37 所示的“Add Time-History Variables”对话框，选中 **【Nodal DOF Results】**，单击 **【OK】** 按钮。

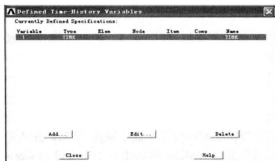


图 6.36 定义变量

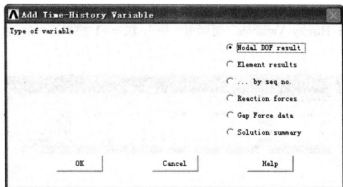


图 6.37 定义变量类型

在弹出的节点拾取对话框中，直接在【List of Items】选项下的文本框中输入节点号“130”（等效冰载荷施加位置的节点，可以通过【Select】菜单选择查看），单击【OK】按钮，弹出如图 6.38 所示的“Define Nodal Data”对话框，其中，变量号设为“2”，节点号为“130”（程序缺省设置，只需加以确认），变量名设置为“Deflection”，项目选择“Translation UX”。设置完成后，单击【OK】按钮退出，返回“Defined Time-History Variables”对话框。

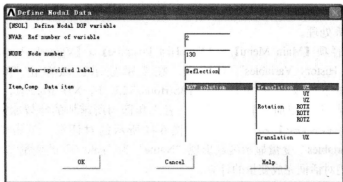


图 6.38 定义时间历程变量

(2) 定义时间历程后处理变量：节点反力变量。

单击“Defined Time-History Variables”对话框的【Add】按钮，出现“Add Time-History Variables”对话框，选中【Reaction forces】，单击【OK】按钮。在弹出的节点拾取对话框中，直接在【List of Items】选项下的文本框中输入节点号“1”（底端主节点），单击【OK】按钮，弹出“Define Nodal Data”对话框，其中，变量号设为“3”，节点号为“1”（程序缺省设置，只需加以确认），变量名设置为“ReactionF_1”，项目选择“Struct forces FX”。设置完成后，单击【OK】按钮退出，返回“Defined Time-History Variables”对话框，继续单击【Add】按钮，出现“Add Time-History Variables”对话框，选中【Reaction forces】，单击【OK】按钮。在弹出的节点拾取对话框中，直接在【List of Items】选项下的文本框中输入节点号“125”（顶端节点），单击【OK】按钮，弹出“Define Nodal Data”对话框，其中，变量号设为“4”，节点号为“125”（程序缺省设置，只需加以确认），变量名设置为“ReactionF_2”，

项目选择“Struct forces FX”。设置完成后，单击【OK】按钮退出，返回如图 6.39 所示的“Defined Time-History Variables”对话框，单击【Close】按钮退出时间历程变量定义对话框。

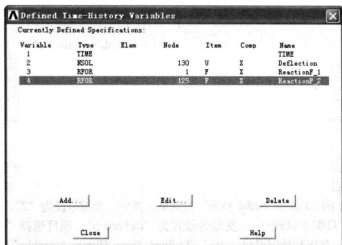


图 6.39 完成定义后的时间历程变量

(3) 变量计算处理。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Variable Viewer】，弹出如图 6.40 所示“Time History Variables”对话框，在变量显示区域单击“ReactionF_2”，在【Calculator】选项下的文本框中输入“ABS(rforce(125, F, X)+ rforce(1, F, X))”，即将上下两端面的结构反力相加并取绝对值，二者之和即为所施加的等效冰载荷值。然后单击计算器区域的【ENTER】按钮，弹出如图 6.41 所示的对话框，单击【否】按钮，在“Time History Variables”变量显示区域出现“Name”为“calc_5”的变量，即结构横向总反力时程变量，关闭对话框完成变量的计算。

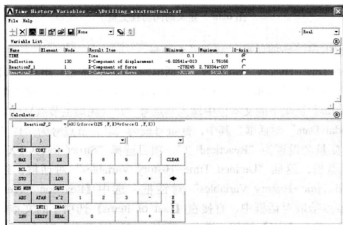


图 6.40 时程变量计算处理

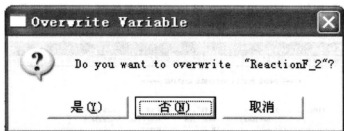


图 6.41 变量计算设置

(4) 绘制载荷—位移曲线。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Settings】>【Graph】，定义横向(X)坐标为位移，在“Graph Settings”对话框中的【XVAR】(X-axis variables)选项后选中【Single variable】，在【Single variable No.】文本框中输入“2”，单击【OK】按钮退出该对话框。

选择菜单路径项【Utility Menu】>【PlotCtrls】>【Style】>【Graphs】>【Modify Axes】，在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题，分别为“Deflection”和“ReactionF”，单击【OK】按钮退出。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Graph Variables】，弹出的对话框中，“NVAR1”文本框中输入“5”，单击【OK】按钮，则可绘制载荷—位移曲线，如图 6.42 所示。

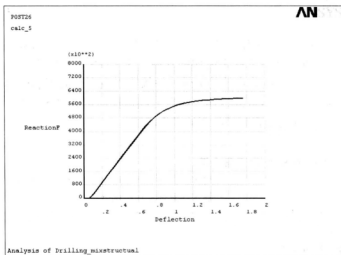


图 6.42 载荷位移曲线

从载荷—位移曲线图中可以看出，此结构的横向极限载荷约为 600kN，也就是图中曲线趋于水平时所对应的纵坐标的数值。

(5) 列表显示时间历程变量结果。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postpro】>【List Variables】，弹出“List Time-Hist Variables”对话框，在【NVAR】右边的文本框中依次输入“2, 3, 4, 5”变量

编号, 单击【OK】按钮, 显示出如图 6.43 所示的变量数据, 可查看变量的具体数据, 也可以保存到其他文件夹, 导入到 Excel 等绘图工具, 用于绘制图形。

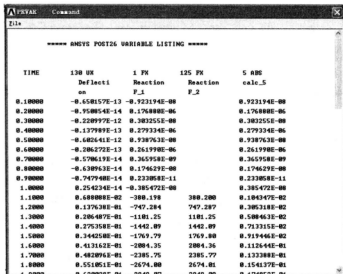


图 6.43 时程变量数据查看

此部分的命令流见本章附录里的 APDL 部分。

6.3 本章小结

本章介绍了隔水导管组合结构的极限承载力分析方法, 介绍了双圆夹层水泥浆结构的建模及非线性求解设置。结合工程实例详细介绍了 ANSYS 求解极限载荷的求解过程, 包括位移加载、耦合自由度、载荷步等的关键步骤操作以及利用时程后处理器进行绘制位移载荷曲线的基本方法。通过本章的讲述, 读者可以掌握利用 ANSYS 进行结构极限载荷的基本过程及相关求解选项的设置和后处理的操作问题。

附录: 本章实例 APDL 建模及分析命令流

```

!*****
组合结构隔水导管弹塑性结构分析
!*****

!***** 分析环境设置
/FILNAME, Drilling_mixstructural, 1
/TITLE, Analysis of Drilling_mixstructural
!**** 定义几何参数
D1=0.6096      ! 外管直径
T1=1*0.0254    ! 外管壁厚
D2=0.3396      ! 内管直径
T2=10.92E-3    ! 内管壁厚
!**** 前处理过程
/PREP7          ! 进入前处理器

```

```

ET, 1, SOLID45 !定义1号单元 SOLID45
ET, 2, SHELL43 !定义2号单元 SHELL43
R, 1, T1 !定义1号实常数 (针对外管)
R, 2, T2 !定义2号实常数 (针对内管)
MP, EX, 1, 3E10 !水泥材料浆参数设置编号为1
MP, PRXY, 1, 0.2
MP, DENS, 1, 2000
TB, MISO, 1, 1, 5, !塑性设置
TBTEMP, 0 !水泥浆应力应变设置编号为2
TBPT,, 0.0005, 15E6
TBPT,, 0.001, 21E6
TBPT,, 0.0015, 24E6
TBPT,, 0.002, 27E6
TBPT,, 0.003, 24E6
MP, EX, 2, 2.1E11 !外管材料参数设置
MP, PRXY, 2, 0.3
MP, DENS, 2, 7850
TB, BKIN, 2, 1 !塑性设置
TBTEMP, 0
TBDATA, 1, 360E6, 0 !屈服强度设置
MP, EX, 3, 2.1E11 !内管材料参数设置编号为3
MP, PRXY, 3, 0.3
MP, DENS, 3, 7850
TB, BKIN, 3, 1 !塑性设置
TBTEMP, 0
TBDATA, 1, 379E6, 0 !屈服强度设置
!**** 建立有限元模型
CSYS, 1 !设置柱坐标系为当前坐标系
!内外钢管模型
K, 1, 0, 0, 0 !建立关键点
K, 2, 0, 0, 55
K, 3, D1/2, 0, 0
K, 4, D1/2, 0, 30
K, 5, D1/2, 0, 55
K, 6, D1/2, 180, 0
K, 7, D1/2, 180, 30
K, 8, D1/2, 180, 55
K, 9, D2/2, 0, 0
K, 10, D2/2, 0, 30
K, 11, D2/2, 0, 55
K, 12, D2/2, 180, 0
K, 13, D2/2, 180, 30
K, 14, D2/2, 180, 55
LSTR, 3, 4 !通过关键点建立线
LSTR, 4, 5
LSTR, 6, 7

```

```

LSTR, 7, 8
LSTR, 9, 10
LSTR, 10, 11
LSTR, 12, 13
LSTR, 13, 14
LESIZE, ALL, 1 ! 线段数划分
ALLSEL
AROTAT, 1, 2, ..., 1, 2, 180 ! 通过线旋转成几何曲面
AROTAT, 5, 6, ..., 1, 2, 180
AROTAT, 3, 4, ..., 1, 2, 180
AROTAT, 7, 8, ..., 1, 2, 180
ALLSEL
LSEL, S, LOC, Z, 0 ! 选择特定位置的线进行划分
LSEL, A, LOC, Z, 30
LSEL, A, LOC, Z, 55
LESIZE, ALL, ..., 3
ALLSEL
ASEL, S, LOC, X, D1/2 ! 选中位于  $X=D1/2$  处的所有面
AATT, 2, 2, 2 ! 设置外管单元属性
AMESH, ALL ! 划分外管有限元模型
ALLSEL
ASEL, S, LOC, X, D2/2 ! 选中位于  $X=D2/2$  处的所有面
AATT, 3, 3, 2 ! 设置内管单元属性
AMESH, ALL ! 划分内管有限元模型
ALLSEL
!***** 夹层水泥浆模型
CYL4, 0, 0, D2/2, 0, D1/2, 180, 30 ! 建立环空柱体
CYL4, 0, 0, D2/2, 180, D1/2, 360, 30
ALLSEL
LSEL, S, LOC, Y, 0 ! 从全部对象中选择  $Y=0$  处的所有线
LSEL, A, LOC, Y, 180 ! 继续选择  $Y=180$  处的所有线
LSEL, U, LOC, X, D2/2 ! 从已选择的线中去掉  $X=D2/2$  处的所有线
LSEL, U, LOC, X, D1/2 ! 继续从已选择的线中去掉  $X=D1/2$  处的所有线
LESIZE, ALL, ..., 2 ! 将已选中的所有线都分为 2 段
ALLSEL
LSEL, S, LOC, X, D2/2 ! 从全部对象中选择  $X=D2/2$  处的所有线
LSEL, A, LOC, X, D1/2 ! 继续选择  $X=D1/2$  处的所有线
LSEL, U, LOC, Y, 0 ! 从已选择的线中去掉  $Y=0$  处的所有线
LSEL, U, LOC, Y, 180 ! 继续从已选择的线中去掉  $Y=180$  处的所有线
LESIZE, ALL, ..., 6 ! 将已选中的所有线都分为 6 段
ALLSEL
LSEL, S, LOC, Y, 0 ! 从全部对象中选择  $Y=0$  处的所有线
LSEL, A, LOC, Y, 180 ! 继续选择  $Y=180$  处的所有线
LSEL, R, LOC, Z, 0, 30 ! 从已选中的线中重新选择  $Z=0\sim30$  处的所有线
LESIZE, ALL, 1 ! 将已选中的所有线按单元长度为 1m 划分
ALLSEL

```

```

VATT, 1,, 1          !设置水泥浆单元属性
VSWEET, all         !采用映射方式划分水泥浆有限元模型
ALLSEL
ESEL, S, MAT,, 1     !选择所有水泥浆单元
NUMMRG, NODE        !合并水泥浆单元节点
ALLSEL
NUMCMP, NODE !压缩所有节点编号
NUMCMP, ELEM !压缩所有单元编号
ALLSEL
!***** 节点耦合
ALLSEL
NSEL, S, LOC, Z, 1, 30 !选择 Z=1-30 范围内的所有节点
CPINTF, ALL          !相邻节点自由度耦合
ALLSEL
NSEL, S, LOC, Z, 0    !部端面所有节点自由度耦合
CP, , ALL, ALL        !部端面所有节点自由度耦合
ALLSEL
NSEL, S, LOC, Z, 55   !上部端面所有节点自由度耦合
CP, , ALL, ALL        !上部端面所有节点自由度耦合
ALLSEL
!***** 求解计算模块
/SOLU                !进入求解计算模块
ANTYPE, 0            !设定为静力分析
NLGEOM, 1            !打开大变形选项
OUTRES, ALL, ALL     !输出所有结果文件
D, 1, ALL            !约束主节点边界条件
!**** 施加载荷
C*** LOADSTEP = 1 !载荷步 1
TIME, 1              !第一载荷步结束时间
ALLSEL
ACEL, 0, 0, 9.8      !施加重力载荷
ALLSEL
LSWRITE, 1           !写入载荷步 1 文件
C*** LOADSTEP = 2 !载荷步 2
!***** 管顶位移
ALLSEL
TIME, 2              !第二载荷步结束时间
NSEL, S, LOC, Z, 55   !选中 Z=55 处的所有节点
D, ALL, UX, 0.1       !对所选中的节点施加 X 方向的位移约束
ALLSEL                !选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, 55   !选中 Z=55 处的所有节点
NSEL, R, LOC, X, D1/2 !在已选中的节点中重新选中 X=D1/2 处的所有节点
CM, NTOP, NODE        !将所选节点定义一个名为 NTOP 的组元
CMSEL, S, NTOP        !选中组元 NTOP
*GET, NUM_NTOP, NODE, 0, COUNT !提取 NTOP 组元中节点数目
F, ALL, FZ, -3E5/NUM_NTOP !施加顶部集中载荷

```



```

ALLSEL
LSWRITE, 2          ! 写入载荷步 2 文件
C*** LOADSTEP =3    ! 载荷步 3
ALLSEL
TIME, 6             ! 第三载荷步结束时间
NSEL, S, LOC, Z, 30 ! 选中 Z=30 处的所有节点
D, ALL, UX, 2.0      ! 对所选中的所有节点施加 X 方向的位移载荷 2.0m
ALLSEL
/NERR,, 1E6         ! 忽略警告
NSUBST, 20          ! 载荷子步数
DELTIM, 0.1         ! 时间间隔
AUTOTS, OFF         ! 自动时间关闭
OUTRES, BASIC, 1    ! 设置输出结果
LSWRITE, 3          ! 写入载荷步 3 文件
LSSOLVE, 1, 3, 1    ! 开始求解计算
SAVE
!***** 通用后处理过程
/POST1              ! 进入通用后处理器 POST1
SET, LAST           ! 读入最后一个载荷步计算文件
/ESHAPE, 1          ! 打开模型形状显示开关
/RATIO, 1, 2.5, 1   ! 设置 X 方向放大系数
PLDISP, 1           ! 绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1 ! 绘制结构整体位移等值线图
ESEL, S, MAT,, 2     ! 选择外管单元
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0 ! 绘制外管结构米塞斯等效应力图
PLNSOL, EPPL, EQV, 0, 1.0 ! 绘制外管结构塑性应变分布图
ALLSEL
ESEL, S, MAT,, 3     ! 选择内管单元
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0 ! 绘制内管结构米塞斯等效应力图
PLNSOL, EPPL, EQV, 0, 1.0 ! 绘制内管结构塑性应变分布图
ALLSEL
ESEL, S, MAT,, 1     ! 选择水泥浆单元
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0 ! 绘制水泥浆结构米塞斯等效应力图
PLNSOL, EPPL, EQV, 0, 1.0 ! 绘制水泥浆结构塑性应变分布图
ALLSEL
FINISH              ! 退出通过后处理器
!***** 时程后处理过程
/POST26             ! 进入时程后处理器 POST26
NSOL, 2, 130, U, X, Deflection ! 定义 130 号节点处的 X 方向位移为 2 号时程变量
Rforce, 3, 1, F, X, ReactionF_1 ! 定义 1 号节点处的 X 方向的反力为 3 号时程变量
Rforce, 4, 125, F, X, ReactionF_2 ! 定义 125 号节点处的 X 方向的反力为 4 号时程变量
NUMVAR, 200         ! 以下对 3 号和 4 号时程变量进行数学运算
FILLDATA, 191,,, 1, 1
REALVAR, 191, 191
FILLDATA, 192,,, 0, 0
FILLDATA, 193,,, 1, 0

```

```

FILldata, 194, , , , -1, 0
FILldata, 195, , , , 1, 1
VARNAME, 195, NSET
! Name: calc_5
! ID: 5
! Function: ABS(rforce(125 , F, X)+rforce(1, F, X)) !将3号和4号时程变量对应值相加取其绝对值
RFORCE, 200, 125, F, X
RFORCE, 199, 1, F, X
ADD, 198, 200, 199
ABS, 5, 198, , , calc_5
STORE, MERGE
/AXLAB, X, Deflection           !定义X轴标题
/AXLAB, Y, ReflectionF         !定义Y轴标题
XVAR, 2                         !将X轴图形显示设置为位移值
PLVAR, 5                        !绘制荷载位移曲线
STORE, MERGE                    !保存图形
PRVAR, 2, 3, 4, 5, , ,        !列表显示2~5号时程变量值
FINISH                          !退出POST26

```

7 单筒三井简易平台桩腿结构力学分析

◇ 本章导读

单筒三井结构简易导管架平台由于其结构简单,施工方便,成本低等优点,可以较广泛地应用于海上边际油田的开采。本章将对这种结构的桩腿进行整体的结构分析,包括静力及动力分析。

本章主要包括如下两个内容:

- 单筒三井结构概述。
- 工程实例:单筒三井结构平台桩腿动力分析。

7.1 单筒三井结构概述

单筒三井技术是一项先进的钻井技术,适用于海洋边际油田及调整井的开发作业,具有很好的适用性,它解决了平台槽口不足而无法完全充分开发储层的问题,并且在一定程度上节省了油田的开发资金,减少海上平台尺寸及平台的数量,节约了工程造价,对油田进行更充分的开发利用,在很大程度上节省油田开发费用。

目前应用的单筒多井有单筒双井及单筒三井,单筒双井技术相对使用较多,国内中国海洋石油渤海 QK17-2 油田及南海 WC13-2 油田均使用过单筒双井技术;而单筒三井技术的应用相对较少,目前只在涠洲 6-1 油田成功应用单筒三井技术,填补了国内钻井领域空白。

顾名思义,单筒三井结构指的是在一个大尺寸外筒内部按照一定的空间位置布置三个井眼。如果采用对称性布置原理,其内外筒几何关系如图 7.1 所示。

单筒三井外筒和内筒之间的关系如式 (7.1) 所示:

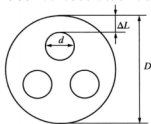


图 7.1 对称性单筒三井布置

$$d = \frac{\sqrt{3}D}{2 + \sqrt{3}} - 2\Delta L \quad (7.1)$$

式中 D ——外筒的内径;
 d ——内筒的外径;
 ΔL ——内筒与外筒之间的最近间隙。

公式 (7.1) 中 D 决定了简易导管架平台单腿的结构和尺寸, d 和 ΔL 则决定了钻井工程的措施、难度及风险。

对于简易导管架平台而言,如果使用单筒三井结构,三根隔水导管全部布置在单腿内部,可以达到施工简单,节约经济的目的。这种结构下,内部隔水导管不仅可以作为钻井的循环通道,也可以作为平台的轴向支撑,具有一定的优越性。其受力状况见图 7.2 所示。

从图 7.2 可以看出,单筒三井结构简易导管架平台所受到的载荷主要来自两部分,一部分是平台顶部甲板及设备重量,另一部分来自海洋环境载荷。利用 ANSYS 进行结构分析时,其基本假定如下:

(1) 平台材料是线弹性的,单元节点力和节点位移之间保持线性关系;

(2) 各单元或结构变形与整个结构尺寸相比很小,可以采用叠加原理;

(3) 泥线以下按 6 倍桩径处固支处理;

(4) 内外管整体受力;

(5) 风浪流载荷沿同一方向作用于桩腿结构(最不利工况)。

7.2 工程实例:单筒三井结构平台桩腿动力分析

现有单筒三井结构简易导管架平台,对其桩腿结构在风浪流载荷作用下的强度及稳定性进行分析,结构模型简化如图 7.3 所示。

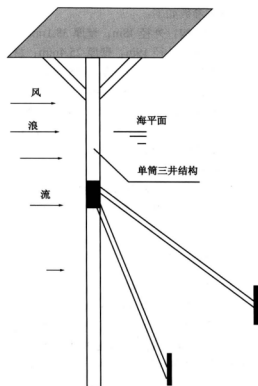


图 7.2 单筒三井结构简易导管架平台

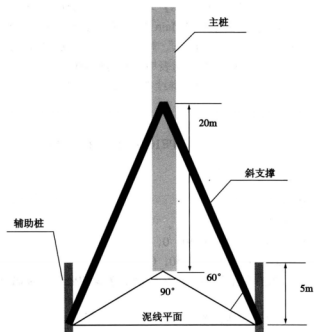


图 7.3 单筒三井简易导管架平台桩腿模型

基本参数如下:

主桩结构: 外径 48in; 壁厚 38.1mm; 材质 D36 钢; 屈服强度 360MPa。

斜支撑: 外径 19in; 壁厚 25.4mm; 材质 D36 钢; 屈服强度 360MPa。

辅助桩: 外径 19in; 壁厚 25.4mm; 材质 D36 钢; 屈服强度 360MPa。

内管结构: 外径 13.375in; 壁厚 10.9mm; 材质 N80 钢; 屈服强度 550MPa。

材料参数: 弹性模量 2.1E11Pa; 泊松比 0.3; 密度 7850kg/m³。

连接位置: 如图 7.3 所示。两斜支撑平面内互相垂直; 斜支撑与泥线平面成 60° 角, 长度为 23.1m; 主桩与斜支撑连接点高度为泥线以上 20m; 主桩与辅助桩间距为 11.5m; 两辅助桩间距为 16.3m。

环境参数: 水深 30m; 海面以上高度 15m; 风速 45m/s; 波高 11.3m; 波周期 8.3s; 海面流速 1.92m/s; 中部流速 1.66m/s; 底部流速 1.43m/s。

平台载荷: 200t。

7.2.1 模型建立

(1) 设置工作环境。

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后, 通过 **【Utility Menu】>【File】>【Change Jobname】**, 指定分析的工作名称为 “Three _in one drilling piles”, 将 New log and error files ? ” 选项设置为 **【yes】**, 单击 **【OK】** 按钮, 通过菜单项 **【Utility Menu】>【File】>【Change Title】**, 指定图形显示区域的标题为 **【Analysis of Three _in one drilling piles】**。

(2) 定义单元类型。

选择 PIPE16 作为 1 号单元, PIPE59 作为 2 号单元。

设置完成后, 单击菜单项 **【Main Menu】>【Preprocessor】**, 进入前处理器 PREP7 开始建模以及其他的前处理操作。单击菜单 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Element Type】>【Add/Edit/Delete】**, 弹出 “Element Type” 对话框, 单击 **【Add】** 按钮, 弹出 “Library of Element Types” 对话框, 在左边下拉列表中选择 **【Pipe】**, 然后在右边的文本框中选中 **【Elast straight16】**, 单击 **【Apply】** 按钮, 继续在右边文本框中选择 **【Immersed 59】**, 单击 **【OK】** 按钮退出。

(3) 设置单元实常数。

定义 6 组实常数, 其中 1 ~ 3 针对 PIPE16 单元, 4 和 5 针对 PIPE59 单元。本部分操作命令如下:

R, 1, 1.2192, 0.05

R, 2, 0.4826, 0.0254

R, 3, 0.3397, 0.0109

R, 4, 1.2192, 0.05, 0.7, 2.0, 1030, 0,

R, 5, 0.4826, 0.0254, 0.7, 2.0, 1030, 0,

GUI 菜单的操作路径为: 单击菜单项 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Real Constants】>【Add/Edit/Delete】**。

(4) 设置材料模型参数及塑性选项。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Material Props】>【Material Models】**, 在弹出的 “Define Material Model Behavior” 对话框的右侧, 依次单击 **【Structural】>**

【Linear】>【Elastic】>【Isotropic】，在弹出的对话框中输入材料弹性模量“2.1E11”以及泊松比“0.3”，单击【OK】按钮，继续返回，单击【Density】弹出密度设置对话框，设置密度为“7850”，单击【OK】，继续单击【Fluids】>【Water Table】设置环境载荷参数，这部分的定义方法与第4章中相同，在此不再赘述。

(5) 建立几何模型。

选择下拉菜单路径【Workplane】>【Change Active CS to】>【Global Cylindrical】，再选择菜单项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Keypoints】>【In Active Cs】，建立如表 7.1 所示的其他三个关键点。

表 7.1 关键点坐标

关键点编号	坐 标 (柱坐标)			备 注
	X	Y	Z	
1	0	0	15	主桩外筒
2	0	0	0	
3	0	0	-10	
4	0	0	-30	
5	0	0	-37	
6	0.280	0	15	内部三管
7	0.280	0	-30	
8	0.280	0	-37	
9	0.280	120	15	
10	0.280	120	-30	
11	0.280	120	-37	
12	0.280	240	15	
13	0.280	240	-30	
14	0.280	240	-37	
15	11.5	45	-25	斜撑辅助桩 1
16	11.5	45	-30	
17	11.5	45	-35	
18	11.5	-45	-25	斜撑辅助桩 2
19	11.5	-45	-30	
20	11.5	-45	-35	

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Lines】>【Straight Line】，弹出关键点拾取对话框，按照表 7.2 所示建立线。

表 7.2 创建线

线 编 号	关 键 点		备 注
1	1	2	主桩外筒
2	2	3	
3	3	4	
4	4	5	
5	6	7	内部三管
6	7	8	
7	9	10	
8	10	11	
9	12	13	
10	13	14	
11	15	16	辅助桩
12	16	17	
13	18	19	
14	19	20	
15	3	16	斜撑
16	3	19	

(6) 有限元网格划分。

①划分线单元。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Size Cntrl】>【ManualSize】>【Lines】>【Picked Lines】，弹出线拾取对话框，选中【Min, Max, Inc】选项，在文本框中输入“1, 14, 1”，单击【OK】按钮，在弹出的“Element Sizes on Picked Lines”对话框中的【SIZE】后的文本框中输入“1”，表示单元长度为 1m。单击【Apply】按钮，返回线拾取对话框，继续选中【List of Items】选项，在文本框中输入“15, 16”，单击【OK】按钮，在弹出的“Element Sizes on Picked Lines”对话框中的【NDIV】后的文本框中输入“20”，表示将斜支撑划分为 20 段。

②设置线单元属性。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh Attributes】>【Lines】>【Picked Lines】，弹出线拾取对话框，选中【List of Items】选项，在文本框中输入“1, 2, 3”，单击【OK】按钮，选择材料类型编号“1”，实常数编号“4”，单元类型编号“2, PIPE59”，单击【OK】按钮。按照表 7.3 设置其他线单元属性。

表 7.3 线单元属性

线 编 号	单 元 属 性			备 注
	材 料 号	实 常 数 号	单元类型号	
1	1	4	2	主 桩 外 筒
2	1	4	2	
3	1	4	2	
4	1	1	1	内部三管
5	1	3	1	
6	1	3	1	
7	1	3	1	
8	1	3	1	
9	1	3	1	
10	1	3	1	辅助桩
11	1	5	2	
12	1	2	1	
13	1	5	2	
14	1	2	1	斜撑
15	1	5	2	
16	1	5	2	

③单元网格划分。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【Mesh】>【Lines】>【Free】，弹出面拾取对话框，单击【Pick All】按钮，有限元网格划分完成，结果如图 7.4 所示。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Numbering Ctrl】>【Merge Items】，在弹出的对话框中的【Label】选项后的下拉列表中选择“Nodes”，单击【OK】按钮。

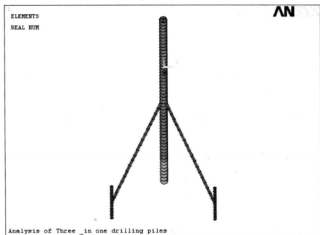


图 7.4 有限元模型

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Coupling/Ceqn】 > 【Couple DOFs】**，弹出节点拾取对话框，选中 **【Box】**，利用鼠标选中桩腿顶部所有节点，单击 **【OK】** 按钮，在弹出对话框的 **【Lab】** 选项后选中 **【All】**，单击 **【OK】** 按钮退出，对顶部内外筒节点自由度全部约束，以保证内外筒变形的一致性。单击常用工具条上的 **【SAVE DB】**，然后单击 **【Finish】** 退出前处理。

本部分的命令流详见本章附录。

7.2.2 静力分析求解

(1) 设置分析类型。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【New Analysis】**，选择“Static”，单击 **【OK】** 按钮退出。

(2) 定义位移边界条件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Displacement】 > 【On Nodes】**，弹出节点拾取对话框，在图形显示区域用鼠标将主桩及辅助桩最下端的节点全部选上，包括内部三根导管的下端部节点，单击 **【OK】** 按钮，弹出位移属性设置对话框，选中 **【All DOFS】**，单击 **【OK】** 按钮退出。

(3) 施加载荷。

① 施加顶部平台载荷。

单击 **【Select】** 下拉菜单路径选择 **【Entities】**，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Nodes”，第二个下拉菜单路径中选中“By Location”并选中“Z Location”，在“Min, Max”文本框中输入“15”，单击 **【OK】** 按钮。选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Coupling/Ceqn】 > 【Couple DOFs】**，弹出“Define Coupled DOFs”拾取对话框，直接单击 **【Pick All】** 按钮，弹出耦合自由度属性设置对话框，在 **【Lab】** 右边的下拉框中选中 **【All】**，单击 **【OK】**，退出。

单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Force/Moment】 > 【On Nodes】**，弹出节点拾取对话框，用鼠标在图形显示区域拾取外筒顶部节点，单击 **【OK】** 按钮弹出“Apply F/M on Nodes”属性值设置对话框，在“Direction of force/moment”中选择“Fz”，在“Force/moment value”中输入“-2E6”，单击 **【OK】** 按钮。

② 施加风载荷。

单击 **【Select】** 下拉菜单路径选择 **【Entities】**，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Elements”，第二个下拉菜单路径中选中“By Attributes”并选中“Real No.”，在“Min, Max”文本框中输入“4”，单击 **【OK】** 按钮。单击 **【Plot】 > 【Nodes】**。

单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Force/Moment】 > 【On Nodes】**，弹出节点拾取对话框，用鼠标在图形显示区域拾取 Z 坐标大于 0 以上的所有节点，单击 **【OK】** 按钮，弹出“Apply F/M on Nodes”属性值设置对话框，在“Direction of force/moment”中选择“Fx”，在“Force/moment value”中输入“17829/15”（总共 15 个节点），单击 **【OK】** 按钮。

③ 定义重力场。

单击菜单路径项 **【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Inertia】>【Gravity】>【Global】**，弹出“Apply (Gravitational) Acceleration”属性值设置对话框，在“ACELX, ACELY, ACELZ”中依次输入“0, 0, 9.8”。

(4) 静力分析求解。

单击菜单路径项 **【Main Menu】>【Solution】>【Solve】>【Current LS】**，对问题进行求解。在求解过程中会看到图示的求解收敛曲线。在求解结束后，弹出“Solution is done!”信息提示框，关闭。单击 **【Main Menu】>【Finish】** 菜单项，退出求解计算模块。

(5) 静力结果分析。

① 读入结果文件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Read Results】**，单击 **【Last Set】**，读入最后一个子步的结果文件。

② 绘制结构整体变形图。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Deformed Shape】**，在弹出的对话框中选择 **【Def shape only】**，显示结构整体变形图，如图 7.5 所示。

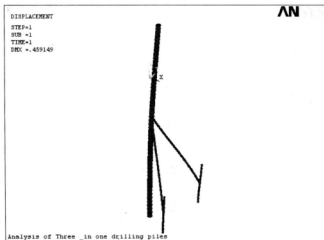


图 7.5 结构整体变形图

③ 绘制结构节点位移等值线云图。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Nodal Solu】**，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，依次单击 **【Nodal Solution】>【DOF Solution】>【Displacement vector sum】**，单击 **【OK】** 按钮，显示如图 7.6 所示的结构节点位移等值线云图。从图 7.6 中可以看出，结构发生最大位移的位置位于平台顶部，数值为 1.581m，由此可以看出，单腿平台在风浪流条件下顶部会产生巨大的横向位移。

④ 绘制单元应力等值线云图。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Element Solu】**，弹出“Contour Element Solution Data”对话框，依次单击 **【Element Solution】>【Stress】>【von Mises stress】**，单击 **【OK】** 按钮，如图 7.7 所示显示结构的米塞斯等效应力云图。

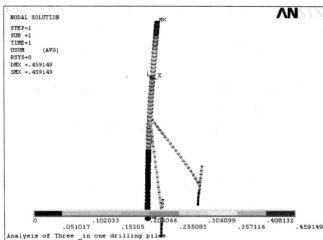


图 7.6 节点位移等值线云图

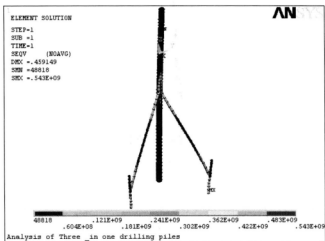


图 7.7 单元等效应力云图

③ 绘制内筒单元应力等值线云图。

单击【Select】下拉菜单路径选择【Entities】，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单路径中选中“Elements”，第二个下拉菜单路径中选中“By Attributes”并选中“Real No.”，在“Min, Max”文本框中输入“3”，单击【OK】按钮。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Element Solu】，弹出“Contour Element Solution Data”对话框，依次单击【Element Solution】>【Stress】>【von Mises stress】，单击【OK】按钮，如图 7.8 所示显示结构的米塞斯等效应力云图。

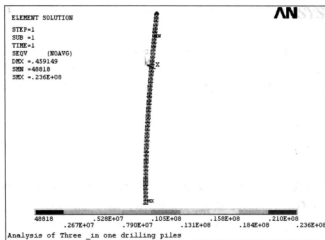


图 7.8 内筒等效应力图

本部分的命令流详见本章附录。

7.2.3 动力分析

为了进行瞬态动力学分析，必须得到结构的瑞利阻尼系数，只要找到结构任意两阶振型的固有角频率就可以计算瑞利阻尼了。因此先选用 ANSYS 程序中的 Block Lanczos 法对平台模型进行模态分析，以提取极端波浪工况各阶振型的自振频率，进而计算固有角频率。

7.2.3.1 模态分析

(1) 模型修改。

打开 ANSYS 程序主界面，导入原来的平台建模部分，选择菜单路径项 **【Main Menu】** > **【Preprocessor】** > **【Element Type】** > **【Add/Edit/Delete】**，弹出 **【Element Type】** 对话框，单击 **【Add】** 按钮，定义 MASS21 为 3 号单元类型，定义实常数 “R, 6,, 2E5”。

选择菜单路径项 **【Main Menu】** > **【Preprocessor】** > **【Modeling】** > **【Create】** > **【Elements】** > **【Elem Attributes】**，弹出单元属性设置对话框，选择单元类型为 “3 MASS21”，实常数为 “7”，其他默认，单击 **【OK】** 退出，选择菜单路径项 **【Utility Menu】** > **【Select】** > **【Entities】**，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单中选中 “Elements”，第二个下拉菜单中选中 “By Attributes” 并选中 “Real No.”，在 “Min, Max” 文本框中输入 “4”，单击 **【OK】** 按钮。单击 **【Plot】** > **【Nodes】**。选择 **【Main Menu】** > **【Preprocessor】** > **【Modeling】** > **【Create】** > **【Elements】** > **【Auto Numbered】** > **【Thru Nodes】**，弹出的节点拾取对话框，在图形显示区域中，用鼠标选中外筒最顶端的节点，单击 **【OK】** 按钮，集中质量单元创建完成，单击菜单路径项 **【Utility Menu】** > **【Select】** > **【Everything】**，模型修改完成。

(2) 耦合自由度。

选择菜单路径项 **【Utility Menu】** > **【Select】** > **【Entities】**，弹出选择项的属性设置对话框，在第一个下拉菜单中选中 “Nodes”，第二个下拉菜单中选中 “By Location” 并选中 “X Location”，在 “Min, Max” 文本框中输入 “0, 0.290”，选中 **【From All】**，单击 **【OK】** 按钮，选择菜单路径项 **【Utility Menu】** > **【Select】** > **【Entities】**，弹出选择项的属性

设置对话框，在第一个下拉菜单中选中“Nodes”，第二个下拉菜单中选中“By Location”并选中“Z Location”，在“Min, Max”文本框中输入“-36, 15”，选中【Reselect】，单击【OK】按钮。选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Coupling/Ceqn】>【Coincident Nodes】，弹出节点拾取对话框，选中【Pick All】，在弹出对话框的【Lab】选项后选中【All appropriate】，在【TOLER】选项后输入“0.8”作为公差项。单击【OK】按钮退出。

(3) 设置位移约束。

进行结构模态分析时，为了略去结构无关的振型，对平台主桩腿所有节点只保留 X 和 ROTY 两个自由度。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Displacement】>【On Nodes】，弹出“Apply U, ROT on Nodes”节点拾取对话框，用鼠标在图形显示区域选中位于主桩底端所有节点和辅助桩底端的节点，单击【OK】按钮，在“DOFs to be constrained”中选择【ALL DOF】，单击【Apply】按钮，继续选取位于主桩上的所有节点，单击【OK】按钮，在“DOFs to be constrained”中选择【UY, UZ, ROTX, ROTZ】，单击【OK】按钮退出。

(4) 进行模态分析。

与前一章分析方法相同，选择分析类型为【MODAL】，只需扩展前 2 阶模态，其分析结果如表 7.4 及图 7.9 至 7.10 所示。

表 7.4 结构固有频率

振 型	一 阶	二 阶
频率 (Hz)	1.1281	4.0763

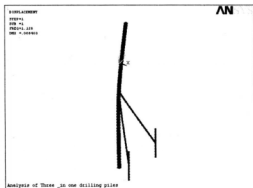


图 7.9 一阶模态

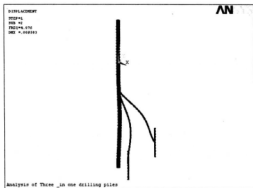


图 7.10 二阶模态

本部分的命令流操作如下：

```

/PREP7           ! 重新进入前处理模块
ET, 3, MASS21    ! 定义 3 号单元类型 MASS21
R, 7,, 2E5       ! 定义 7 号实常数 (针对 MASS21 单元)
TYPE, 3          ! 选中 3 号单元类型

```

```

REAL, 7          ! 选中 7 号实常数
NSEL, S, LOC, Z, 15 ! 选中 Z=15 处的节点
NSEL, R, LOC, X, 0 ! 在已选中的节点中重新选取 X=0 处的节点
E, ALL          ! 通过已选中的节点创建 MASS21 单元
ALLSEL          ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, -36, 15 ! 选中 Z=-36~15 范围内的所有节点
NSEL, R, LOC, X, 0, 0.290 ! 在已选中的节点中重新选取 X=0~0.290 范围内的节点
CPINTF, ALL, 0.8 ! 将所选中的节点进行耦合
ALLSEL          ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, -36, 15 ! 选中 Z=-36~15 范围内的所有节点
NSEL, R, LOC, X, 0, 0.290 ! 在已选中的节点中重新选取 X=0~0.290 范围内的节点
D, ALL, UY      ! 约束所选中节点的 Y 方向位移自由度
D, ALL, UZ      ! 约束所选中节点的 Z 方向位移自由度
D, ALL, ROTX    ! 约束所选中节点的 X 方向转动自由度
D, ALL, ROTZ    ! 约束所选中节点的 Z 方向转动自由度
ALLSEL          ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, -37 ! 选中 Z=-37 处的节点
D, ALL, ALL      ! 约束所选中节点的全部自由度
ALLSEL          ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, X, 11.5 ! 选中 X=11.5 处的节点
D, ALL, ALL      ! 约束所选中节点的全部自由度
ALLSEL          ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8 ! 施加重力载荷
/SOLU           ! 进入求解计算模块
ANTYPE, MODAL   ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT, LANB, 2 ! 模态求解方法设置
MXPAND, 2       ! 扩展两阶模态
SOLVE          ! 执行模态求解计算
FINISH         ! 退出求解计算模块
/POST1         ! 进入通用后处理器
SET, LIST      ! 列表显示求解结果
SET, FIRST     ! 读取一阶模态结果
PLDISP, 0      ! 绘制一阶模态图形
SET, NEXT      ! 读取二阶模态结果
PLDISP, 0      ! 绘制二阶模态图形
FINISH         ! 退出后处理模块

```

7.2.3.2 瞬态动力分析

进行瞬态动力分析所采用的结构有限元模型与模态分析时完全相同。由模态分析所得到的阻尼系数进行瞬态动力分析，将桩腿顶部载荷等效为质量模块作用在结构顶部，时程

分析取作用时间为 100s, 时间间隔 0.2s。根据模态分析所得到前两阶固有频率可计算得到瑞利阻尼系数为: $\alpha = 0.3331$, $\beta = 1.834E-3$ 。

(1) 波流参数修改。

由于是分析波流载荷所引起的水动力效应, 因此将波浪的相位角设置为 0° , 选择 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Material Props】 > 【Material Models】**, 在弹出的“Define Material Model Behavior”对话框中, 选择 **【Water Table】** 选项, 单击打开, 将原来静力分析所输入的波浪相位角 75° 改为 0° , 单击 **【OK】** 按钮退出。命令流如下:

TB, 81, 0 ! 修改 WATERTABLE 里的波浪相位角为 0°

(2) 求解选项设置。

① 设置求解类型。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【New Analysis】**, 弹出“Type of analysis”对话框, 选中分析类型为 **【Transient】**, 如图 7.11 所示, 分析方法选择 **【Full】**, 单击 **【OK】** 按钮退出。

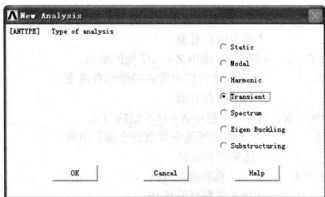


图 7.11 分析选项设置

② 求解控制项设置。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【Sol'n Controls】**, 弹出“Solution Controls”对话框, 在 **【Basic】** 选项下的 **【Analysis Options】** 选中“Large Displacement Transient”, 然后选中 **【Transient】**, 在 **【Damping Coefficients】** 选项下的 **【ALPHA】** 后输入“0.3331”, 在 **【BETA】** 后输入“1.834E-3”, 其他选项默认, 单击 **【OK】** 按钮退出, 如图 7.12 所示。命令流如下:

ANTYPE, TRANS ! 设置求解类型为瞬态动力分析

ALPHAD, 0.3331 ! 设置阻尼系数 α

BETAD, 1.834E-3 ! 设置阻尼系数 β

③ 设置边界条件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Displacement】 > 【On Nodes】**, 弹出节点拾取对话框, 在图形显示区域用鼠标将主桩及辅助桩最下端的节点全部选上, 包括内部三根导管的下端部节点, 单击 **【OK】** 按钮, 弹出位移移属性设置对话框, 选中 **【All DOFS】**, 单击 **【OK】** 按钮退出。

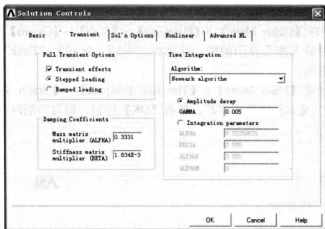


图 7.12 求解控制设置

④施加重力载荷。

单击菜单路径项 **【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Inertia】>【Gravity】>【Global】**，弹出“Apply (Gravitational) Acceleration”属性值设置对话框，在“ACELX, ACELY, ACELZ”中依次输入“0, 0, 9.8”。

⑤求解。

设置时程分析结束时间为 100s，时间间隔为 0.2s。本部分利用命令流形式输入，如下：

```
*DO, I, 10E-12, 100, 0.2      ! 设定结束时间及子步时间开始循环计算
TIME, I                      ! 循环计算结束时间
OUTPES, ALL, ALL             ! 输出结果设置
SOLVE, SAVE                  ! 执行求解并保存
*ENDDO                       ! 结束循环求解计算
```

(3) 结果分析。

①进入时间历程后处理器 POST26。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【TimeHist Postpro】**，进入时间历程后处理器。

②定义时间历程后处理变量 2。

选择 **【Main Menu】>【TimeHist Postpro】>【Define Variables】**，在弹出的“Define Time-History Variables”对话框中，单击 **【Add】** 按钮，出现“Add Time-History Variables”对话框，选中 **【Nodal DOF Result】**，单击 **【OK】** 按钮，出现的“Define Nodal Data”对象拾取对话框中，选中 **【List of Items】**，在文本框中输入“1”，即桩腿顶端节点，然后单击 **【OK】** 按钮。出现“Define Nodal Data”对话框，在 **【Name】** 一栏中输入“Deflection”，在 **【Item, Comp】** 选项后的列表中选择 **【DOF solution】>【Translation UX】**，其他选项默认，单击 **【OK】** 退出。

③绘制时程一位移曲线。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Settings】>【Graph】**，定义横向 (X) 坐标为时间，在“Graph Settings”对话框中的 **【XVAR】** (X-axis variables) 选项后选中 **【Single variable】**，在 **【Single variable No.】** 文本框中输入“1”，单击 **【OK】** 按

钮退出该对话框。

选择菜单路径项 **【Utility Menu】 > 【PlotCtrls】 > 【Style】 > 【Graphs】 > 【Modify Axes】**，在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题，分别为“Time”和“Deflection”，单击**【OK】**按钮退出。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【TimeHist Postproc】 > 【Graph Variables】**，弹出对话框中，“NVAR1”文本框中输入“2”，单击**【OK】**按钮，则可绘制时间—位移曲线，如图 7.13 所示。

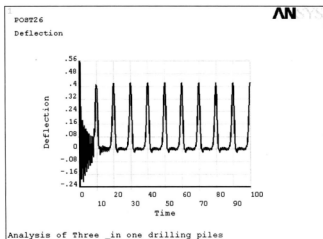


图 7.13 桩腿顶端时间—位移曲线

④绘制结构弱点处的应力—时程曲线。

由静力分析可知，斜撑与主桩的连接位置对整个结构的性能起关键的作用。因此接下来需要查看该位置上的节点应力随着时间的变化关系。

选择 **【Main Menu】 > 【TimeHist Postpro】 > 【Define Variables】**，在弹出的“Define Time—History Variables”对话框中，单击**【Add】**按钮，出现“Add Time—History Variables”对话框，选中 **【...by set no.】**，单击**【OK】**按钮，弹出对象拾取对话框中，选中 **【List of Items】**，在文本框中输入“17”，即连接点处节点编号，然后单击**【OK】**按钮。出现“Define Element Results by Seq No.”对话框，如图 7.14 所示。在**【Name】**一栏中输入“STRESS”，在**【Item】**选项后的列表中选择 **【SMISC】**，在**【Comp Sequence number】**一栏中输入“15”，其他选项默认，单击**【OK】**退出。

选择菜单路径项 **【Utility Menu】 > 【PlotCtrls】 > 【Style】 > 【Graphs】 > 【Modify Axes】**，在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题，分别为“Time”和“STRESS”，单击**【OK】**按钮退出。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【TimeHist Postproc】 > 【Graph Variables】**，弹出对话框中，“NVAR1”文本框中输入“3”，单击**【OK】**按钮，则可绘制时间—应力曲线，如图 7.15 所示。

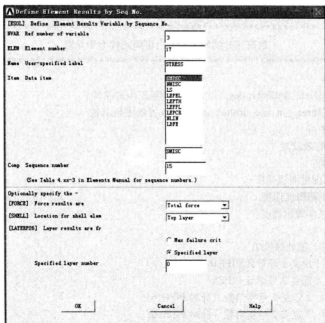


图 7.14 时程变量设置

结果分析部分命令流详见本章附录部分。

7.3 本章小结

本章介绍了单筒三井结构的动力有限元模拟过程。首先介绍了单筒三井结构的基本结构特点，接着结合工程实例详细介绍了有限元建模过程和基本的分析设置，重点介绍了瞬态动力分析的过程。通过本章实例的学习，读者可以掌握利用 ANSYS 进行海洋结构物的动力分析方法及后处理的基本过程。

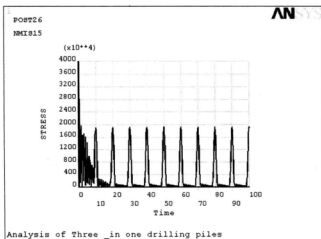


图 7.15 结构关键节点时程—应力曲线

附录：本章实例 APDL 建模及分析命令流

```

*****
                                单筒三井结构简易平台桩腿结构力学分析
*****

!***** 分析环境设置
/FILENAME, Three_in one drilling piles, 1      !设置工作文件名
/TITLE, Analysis of Three_in one drilling piles !设置图表显示名
!***** 设置基本参数
H_wave=13.8      !有效波高
T_wave=10.0      !周期
V_surface=1.92   !水面处海流速度
V_middle=1.66    !中部海流速度
V_bottom=1.43    !底部海流速度
!***** 前处理过程
/PREP7          !进入前处理模块
ET, 1, PIPE16   !定义1号单元 PIPE16
ET, 2, PIPE59   !定义2号单元 PIPE59
R, 1, 1.2192, 0.0381 !定义1号实常数 (针对 PIPE16)
R, 2, 0.4826, 0.0254 !定义2号实常数 (针对 PIPE16)
R, 3, 0.3397, 0.0109 !定义3号实常数 (针对 PIPE16)
R, 4, 1.2192, 0.05, 0.7, 2.0, 1030, 0 !定义4号实常数 (针对 PIPE59)
R, 5, 0.4826, 0.0254, 0.7, 2.0, 1030, 0 !定义5号实常数 (针对 PIPE59)
MP, EX, 1, 2.1E11 !定义弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3 !定义泊松比
MP, DENS, 1, 7850 !定义密度
!***** 波流参数 Water Table
TBDE, WATE, 1
TB, WATE, 1,, 0
TBMODIF, 1, 1, 2 !选择 Stokes 五阶波理论
TBMODIF, 1, 2, 0 !选择波流耦合作用方式
TBMODIF, 1, 3, 30 !水深
TBMODIF, 1, 4, 1030 !海水密度
TBMODIF, 1, 5, 0 !波浪作用方向
TBMODIF, 2, 1, -30 !海水底部坐标值
TBMODIF, 2, 2, V_bottom !底部流速
TBMODIF, 2, 3, 0 !底部海流方向
TBMODIF, 2, 4, -15 !海水中部坐标值
TBMODIF, 2, 5, V_middle !中部流速
TBMODIF, 2, 6, 0 !中部海流方向
TBMODIF, 3, 1, 0 !海水表面坐标值
TBMODIF, 3, 2, V_surface !表面流速
TBMODIF, 3, 3, 0 !表面海流方向
TBMODIF, 14, 1, H_wave !波高
TBMODIF, 14, 2, T_wave !周期
TBMODIF, 14, 3, 0 !波浪相位角
!***** 模型建立

```

```

CSYS, 1          ! 以柱坐标为当前坐标系
K, 1, 0, 0, 15    ! 以下建立关键点
K, 2, 0, 0, 0
K, 3, 0, 0, -10
K, 4, 0, 0, -30
K, 5, 0, 0, -37
K, 6, 0.290, 0, 15
K, 7, 0.290, 0, -30
K, 8, 0.290, 0, -37
K, 9, 0.290, 120, 15
K, 10, 0.290, 120, -30
K, 11, 0.290, 120, -37
K, 12, 0.290, 240, 15
K, 13, 0.290, 240, -30
K, 14, 0.290, 240, -37
K, 15, 11.5, 45, -25
K, 16, 11.5, 45, -30
K, 17, 11.5, 45, -35
K, 18, 11.5, -45, -25
K, 19, 11.5, -45, -30
K, 20, 11.5, -45, -35
LSTR, 1, 2        ! 通过关键点创立线
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 5
LSTR, 6, 7
LSTR, 7, 8
LSTR, 9, 10
LSTR, 10, 11
LSTR, 12, 13
LSTR, 13, 14
LSTR, 15, 16
LSTR, 16, 17
LSTR, 18, 19
LSTR, 19, 20
LSTR, 3, 16
LSTR, 3, 19
ALLSEL            ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 1, 14, 1    ! 选中 1~14 号线
LESIZE, ALL, 1            ! 将所选中的线按 1m 划分段
ALLSEL            ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 15, 16, 1    ! 选中 15、16 号线
LESIZE, ALL,, 20          ! 将所选中的线划分为 20 段
ALLSEL            ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 1, 3, 1      ! 选中 1~3 号线
LATT, 1, 4, 2              ! 为线分配材料类型、实常数和单元类型

```

```

ALLSEL                ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 4      ! 选中 4 号线
LATT, 1, 1, 1          ! 为线分配材料类型、实常数和单元类型
ALLSEL                ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 5      ! 选中 5 号线
LSEL, A, LINE,, 7      ! 继续选中 7 号线
LSEL, A, LINE,, 9      ! 继续选中 9 号线
LATT, 1, 3, 1          ! 为线分配材料类型、实常数和单元类型
ALLSEL                ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 6      ! 选中 6 号线
LSEL, A, LINE,, 8      ! 继续选中 8 号线
LSEL, A, LINE,, 10     ! 继续选中 10 号线
LATT, 1, 3, 1          ! 为线分配材料类型、实常数和单元类型
ALLSEL                ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 11     ! 选中 11 号线
LSEL, A, LINE,, 13     ! 继续选中 13 号线
LSEL, A, LINE,, 15, 16, 1 ! 继续选中 15、16 号线
LATT, 1, 5, 2          ! 为线分配材料类型、实常数和单元类型
ALLSEL                ! 选中所有对象
LSEL, S, LINE,, 12     ! 选中 12 号线
LSEL, A, LINE,, 14     ! 继续选中 14 号线
LATT, 1, 2, 1          ! 为线分配材料类型、实常数和单元类型
ALLSEL                ! 选中所有对象
LMESH, 1, 16, 1        ! 划分 1~16 号线单元
LSEL, S, LOC, Z, 15    ! 选中 Z=15 处的所有节点
CP,, ALL, ALL          ! 耦合所选节点的全部自由度
ALLSEL                ! 选中所有对象

!***** 静力求解计算
/SOLU                  ! 进入求解计算模块
ANTYPE, 0              ! 设置求解类型为结构静力计算
NSEL, S, LOC, Z, -37   ! 选中 Z=-37 处的所有节点
D, ALL, ALL            ! 约束所选节点的全部自由度
ALLSEL                ! 重新选中所有对象
NSEL, S, LOC, X, 11.5  ! 选中 X=11.5 处的所有节点
NSEL, R, LOC, Z, -35   ! 从已选节点中重新选中 Z=-35 处的所有节点
D, ALL, ALL            ! 约束所选节点的全部自由度
ALLSEL                ! 重新选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, 15    ! 选中 Z=15 处的所有节点
NSEL, R, LOC, X, 0     ! 从已选节点中重新选中 X=0 处的所有节点
F, ALL, FZ, -2E6       ! 对所选节点施加 Z 方向的载荷
ALLSEL                ! 重新选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, 1, 15 ! 选中 Z=1~15 范围内的所有节点
NSEL, R, LOC, X, 0     ! 从已选节点中重新选中 X=0 处的所有节点
F, ALL, FX, 17829/15   ! 对已选节点施加 X 方向的载荷
ALLSEL                ! 重新选中全部对象

```

```

ACEL, 0, 0, 9.8          !施加重力载荷
SOLVE                   !执行求解计算
SAVE                    !保存求解结果
FINI                    !退出求解计算模块
!***** 静力分析后处理
/POST1                  !进入通用后处理器
SET, LAST               !读入计算结果文件
/ESHAPE, 1.0            !打开模型线形状选项
PLDISP, 0               !绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1.0  !绘制结构位移等值图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0  !绘制结构等效应力分布云图
ESEL, S, REAL,, 3       !选中内筒单元
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0  !绘制内筒等效应力分布云图
FINISH                  !退出后处理器
!***** 结构模态分析
/PREP7                  !重新进入前处理模块
ET, 3, MASS21           !定义3号单元类型 MASS21
R, 7,, 2E5              !定义7号实常数 (针对 MASS21 单元)
TYPE, 3                 !选中3号单元类型
REAL, 7                 !选中7号实常数
NSEL, S, LOC, Z, 15     !选中 Z=15 处的节点
NSEL, R, LOC, X, 0      !在已选中的节点中重新选取 X=0 处的节点
E, ALL                  !通过已选中的节点创建 MASS21 单元
ALLSEL                  !选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, -36, 15 !选中 Z=-36~15 范围内的所有节点
NSEL, R, LOC, X, 0, 0.290 !在已选中的节点中重新选取 X=0~0.290 范围内的节点
CPINTF, ALL, 0.8        !将所选中的节点进行耦合
ALLSEL                  !选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, -36, 15 !选中 Z=-36~15 范围内的所有节点
NSEL, R, LOC, X, 0, 0.290 !在已选中的节点中重新选取 X=0~0.290 范围内的节点
D, ALL, UY              !约束所选中节点的 Y 方向位移自由度
D, ALL, UZ              !约束所选中节点的 Z 方向位移自由度
D, ALL, ROTX            !约束所选中节点的 X 方向转动自由度
D, ALL, ROTZ            !约束所选中节点的 Z 方向转动自由度
ALLSEL                  !选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, -37     !选中 Z=-37 处的节点
D, ALL, ALL              !约束所选中节点的全部自由度
ALLSEL                  !选中所有对象
NSEL, S, LOC, X, 11.5    !选中 X=11.5 处的节点
D, ALL, ALL              !约束所选中节点的全部自由度
ALLSEL                  !选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8          !施加重力载荷
/SOLU                   !进入求解计算模块
ANTYPE, MODAL           !设置分析类型为模态分析
MODOPT, LANB, 2         !模态求解方法设置
MXPAND, 2               !扩展两阶模态

```

```

SOLVE                ! 执行模态求解计算
FINISH              ! 退出求解计算模块
/POST1              ! 进入通用后处理器
SET, LIST           ! 列表显示求解结果
SET, FIRST          ! 读取一阶模态结果
PLDISP, 0           ! 绘制一阶模态图形
SET, NEXT           ! 读取二阶模态结果
PLDISP, 0           ! 绘制二阶模态图形
FINISH              ! 退出后处理模块
!***** 瞬态动力分析
/PREP7              ! 进入前处理模块
TB, 81, 0           ! 修改 WATERTABLE 里的波浪相位角为 0°
/SOLU               ! 进入求解计算模块
ANTYPE, TRANS       ! 设置求解类型为瞬态动力分析
ALPHAD, 0.3331      ! 设置阻尼系数  $\alpha$ 
BETAD, 1.834E-3     ! 设置阻尼系数  $\beta$ 
TRNOPT, FULL        ! 设定瞬态动力求解方法
NLGEOM, ON          ! 打开大变形开关
NSUBST, 1, , , 1
*DO, I, 10E-12, 100, 0.2 ! 设定结束时间及子步时间开始循环计算
TIME, I              ! 循环计算结束时间
OUTPES, ALL, ALL     ! 输出结果设置
SOLVE, SAVE          ! 执行求解并保存
*ENDDO              ! 结束循环求解计算
!***** 时程后处理过程
/POST26             ! 进入时程后处理器 POST26
NSOL, 2, 1, U, X, Deflection ! 定义 1 号节点处的 X 方向位移为 2 号时程变量
/AXLAB, X, Time      ! 定义 X 轴标题
/AXLAB, Y, Deflection ! 定义 Y 轴标题
PLVAR, 2             ! 绘制时程位移曲线
ESOL, 3, 17, , SMIS, 15, STRESS ! 定义 17 号单元的等效应力为 3 号时程变量
/AXLAB, X, Time      ! 定义 X 轴标题
/AXLAB, Y, Stress    ! 定义 Y 轴标题
PRVAR, 3             ! 绘制时程应力曲线
FINISH              ! 退出 POST26

```

8 深水隔水导管与导向孔相互作用分析

◇ 本章导读

对于水深较深的海域,需要安装导向孔来固定隔水导管,使其能够满足作业要求,本章将对二者之间相互作用的力学问题进行分析,结合工程实例介绍 ANSYS 解决此类问题的一些基本方法。

本章主要包括如下两个内容:

- 隔水导管导向孔简述。
- 工程实例:某油田隔水导管与导向孔相互作用研究。

8.1 隔水导管导向孔简述

海上钻井隔水导管是从海上钻井平台下到海底浅层的套管,主要功能是隔离海水、形成钻井液循环通道,同时作为海上井口的持力结构。在海上石油的勘探中,钻井隔水管道的稳定性对于整个石油的勘探、开采起着非常重要的作用。对于水深较深的海域,海浪流会对隔水管道的稳定性产生很大的影响。为了能够在恶劣环境载荷下正常作业不至于管道结构失效,一般情况下需要沿着隔水导管长度方向在水面与水下一定位置安装导向孔,各层导向孔槽口使用扶正块来补偿隔水导管和导管架导向孔槽口之间的间隙,以减少隔水导管承受的疲劳应力和涡激应力,延长隔水导管的使用寿命。一般情况下,先将导向孔固定在导管架平台的桩腿上,再使用扶正块来补偿隔水导管与导向孔之间的间隙,用以固定隔水导管,从结构上来讲,就是减小隔水管的自由长度降低有效长细比来提高其稳定性。

但是随着水深的增加,水下导向孔及扶正块的安装越来越困难,目前国内公司可以实现扶正块安装作业的水深能力有限。所以进行对隔水导管导向孔安装位置及个数的优化研究显得尤为重要,研究结果能够更好地为海上钻井隔水导管导向孔的施工提供科学依据和安全保障,进一步减少盲目性和复杂事故的发生。

钻井隔水导管受到的主要载荷包括:上端部井口载荷,结构自重,浮力等轴向载荷;另外主要受到海洋风浪流等复杂环境载荷。对于隔水导管下部边界条件的处理方法是根据有效桩长法,将导管泥面以下六倍桩径处看做固支端,上部边界横向位移受铰支约束,轴向可以自由滑动。对于导向孔采用以下假设处理:

- (1) 导向孔固定于导管架上,看做固定构件,为隔水导管提供稳定的横向支撑。
- (2) 导向孔与隔水导管之间间隙用扶正块将其固定,隔水导管横向位移自由度受到约束,因此,在分析中可将安装导向孔位置处的导管模型约束其横向位移自由度。隔水导管力学分析模型如图 8.1 所示。

8.2 工程实例：某油田隔水导管与导向孔相互作用研究

以某油田为例，隔水导管导向孔安装位置如图 8.2 所示。该油田所在的海域水深大约为 117m。原来设计在水面以下安装四层导向孔，水面以上安装一层导向孔，具体的位置在钻井转盘面以下 30.10m（水上），52.60m（水下第一层），76.60m（水下第二层），101.60m（水下第三层），128.60m（水下第四层）。

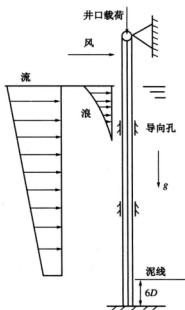


图 8.1 隔水导管力学分析模型

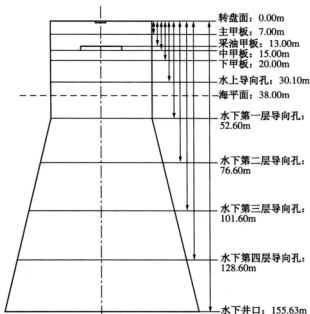


图 8.2 导向孔安装示意图

可以看出对于水下第四层导向孔及扶正块的安装难度极大，超过了目前国内公司的作业能力。因此需要对不同海况条件下的不同导向孔个数进行力学分析，分析结果可以认为是否有必要安装第四层导向孔提供可靠的理论依据。其具体参数如下：

隔水导管尺寸：外径 508mm；壁厚 25.4mm。

材料参数：弹性模量 $2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ ；泊松比 0.3；密度 7850kg/m^3 。

环境参数：海况重现期 50 年的环境载荷条件为风速 45.2m/s，有效波高 12.8m，有效周期 13.1s；海流表层流速 2.21m/s，中部 1.32m/s，底部 0.74m/s；水深 117.63m，海面以上高度 38m。

顶部载荷：30t。

8.2.1 模型建立

(1) 设置工作环境。

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，指定分析的工作名称为“Drilling riser optimi-

zation”，指定图形显示区域的标题为【Analysis of Drilling riser optimization】。

(2) 定义单元类型。

选择菜单项【Main Menu】>【Preprocessor】，进入前处理器 PREP7 开始建模以及其他的前处理操作。单击菜单【Main Menu】>【Preprocessor】>【Element Type】>【Add/Edit/Delete】，定义两种单元类型“PIPE16”和“PIPE59”。

ET, 1, PIPE16 ! 定义 1 号单元类型 PIPE16

ET, 2, PIPE59 ! 定义 2 号单元类型 PIPE59

(3) 设置单元实常数。

单击菜单项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Real Constants】>【Add/Edit/Delete】，分别设置 PIPE16 单元的外径和壁厚，PIPE59 单元的外径、壁厚及相关的流体参数设置。具体如下面的命令流：

R, 1, 0.508, 0.0254 ! 定义 1 号实常数（针对 PIPE16 单元）

R, 2, 0.508, 0.0254, 0.7, 2.0, 1030, 0, ! 定义 2 号实常数（针对 PIPE59 单元）

(4) 设置材料模型参数及塑性选项。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Material Props】>【Material Models】，弹出“Define Material Model Behavior”对话框，在对话框的右侧，依次单击【Structural】>【Linear】>【Elastic】>【Isotropic】，在出现的对话框中输入材料弹性模量“2.1E11”以及泊松比“0.3”，如图 4.8 所示，单击【OK】按钮，继续返回单击【Density】弹出密度设置对话框，设置密度为“7850”，单击【Fluids】>【Water Table】设置环境载荷参数，具体见本章附录命令流所示。

(5) 建立几何模型。

本例将采用直接通过建立节点的方法建立有限元模型，由于在使用 PIPE59 单元时，坐标原点需设置在水面处。因此在建模时，将对图 8.2 所示的坐标进行相应的修改。

① 建立单元节点。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Nodes】>【In Active Cs】，建立位于转盘面处导管的节点，编号为“1”，坐标为（0，0，38），单击【Apply】按钮，继续定义水上导向孔位置的节点，编号“31”，坐标为（0，0，7.9），接着水面处节点，编号为“39”，坐标为（0，0，0），依次定义水下第一层导向孔处节点，编号“54”，坐标为（0，0，-14.6），水下第二层导向孔处节点，编号“78”，坐标为（0，0，-38.6），水下第三层导向孔处节点，编号“103”，坐标为（0，0，-63.6），水下第四层导向孔处节点，编号“130”，坐标为（0，0，-90.6），水下井口处（即泥线处）节点，编号“157”，坐标为（0，0，-117.63），导管固支端节点，编号“160”，坐标为（0，0，-120.63），单击【OK】按钮。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Nodes】>【Fill between Nds】，弹出节点拾取对话框，利用鼠标在图形显示区域拾取节点“1”和“31”，单击【OK】按钮，在弹出的对话框中默认所有选项，单击【Apply】按钮进行填充操作，按照相同方法填充其他节点，结果如图 8.3 所示。此部分的命令流操作如下：

N, 1, 0, 0, 38 ! 建立 1 号节点

N, 31, 0, 0, 7.9 ! 建立 31 号节点

FILL ! 在 1 号和 31 号节点之间生成 2~30 号节点

N, 39, 0, 0, 0	! 建立 39 号节点
FILL	! 在 31 号和 39 号节点之间生成 2~38 号节点
N, 54, 0, 0, -14.6	! 建立 54 号节点
FILL	! 在 39 号和 54 号节点之间生成 40~53 号节点
N, 78, 0, 0, -38.6	! 建立 78 号节点
FILL	! 在 54 号和 78 号节点之间生成 55~77 号节点
N, 103, 0, 0, -63.6	! 建立 103 号节点
FILL	! 在 78 号和 103 号节点之间生成 79~102 号节点
N, 130, 0, 0, -90.6	! 建立 130 号节点
FILL	! 在 103 号和 130 号节点之间生成 104~129 号节点
N, 157, 0, 0, -117.63	! 建立 157 号节点
FILL	! 在 130 号和 157 号节点之间生成 131~156 号节点
N, 160, 0, 0, -120.63	! 建立 160 号节点
FILL	! 在 157 号和 160 号节点之间生成 158、159 号节点

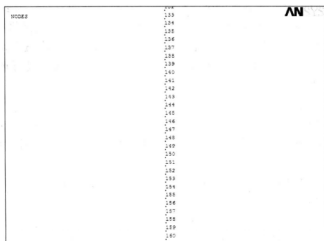


图 8.3 节点建立结果

②通过节点建立单元。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Elements】>【Elem Attributes】**，弹出“Element Attributes”对话框，在 **【TYPE】** 选项后的下拉框中选中“2 PIPE59”，在 **【MAT】** 选项后的下拉列表中选中“1”，在 **【REAL】** 选项后的下拉列表中选择“2”单元实常数。单击 **【OK】** 按钮。单击 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Elements】>【Auto Numbered】>【Thru Nodes】**，弹出节点拾取对话框，利用鼠标在图形显示区域选中节点 1 和 2，单击 **【Apply】** 按钮，继续选择节点 2 和 3，3 和 4，…，43 和 44。单击 **【OK】** 按钮。

按照上述相同的操作过程，创建泥线以下桩腿单元和非线性弹簧单元，最终建立的有限元模型如图 5.10 所示。如采用循环语句建立单元的命令流如下：

TYPE, 2	! 选中 2 号单元类型
REAL, 2	! 选中 2 号单元类型
MAT, 1	! 选中 1 号材料模型
*DO, I, 1, 156, 1	! 参数化建模
E, I, I+1	! 通过相邻节点建立单元模型
*ENDDO	! 完成泥线以上 PIPE59 单元模型
TYPE, 1	! 选中 1 号单元类型
REAL, 1	! 选中 1 号单元类型
MAT, 1	! 选中 1 号材料模型
*DO, I, 157, 159, 1	! 参数化建模
E, I, I+1	! 通过相邻节点建立单元模型
*ENDDO	! 完成泥线以下 PIPE16 单元

③导向孔处理。

根据模型假设, 将安装导向孔位置处的导管模型按约束其横向位移自由度来处理。

选择常用工具栏菜单 **【Select】>【Entities】**, 弹出选择项的属性设置对话框, 在第一个下拉菜单中选中“Nodes”, 第二个下拉菜单中选中“By Location”并选中“Z coordinates”, 在“Min, Max”文本框中输入“7.9”, 并选中 **【From All】**, 单击 **【OK】** 按钮。继续选择 **【Select】>【Entities】**, 选中 **【Nodes】>【By Location】>【Z coordinates】**, 在“Min, Max”文本框中输入“-14.6”, 并选中 **【Also Select】**, 单击 **【OK】**, 重复操作选中位于所有导向孔的节点。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【Preprocessor】>【Loads】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Displacement】>【On Nodes】**, 弹出节点拾取对话框, 选中 **【Pick All】** 按钮, 弹出自由度设置对话框, 选择“UX, UY”, 单击 **【OK】** 退出。选择常用工具栏菜单 **【Select】>【Everything】**。命令流如下:

NSEL, S, LOC, Z, 7.9	! 选中 Z=7.9 处的节点
NSEL, A, LOC, Z, -14.6	! 继续选中 Z=-14.6 处的节点
NSEL, A, LOC, Z, -38.6	! 继续选中 Z=-38.6 处的节点
NSEL, A, LOC, Z, -63.6	! 继续选中 Z=-63.6 处的节点
NSEL, A, LOC, Z, -90.6	! 继续选中 Z=-90.6 处的节点 (选择性约束)
D, ALL, UX	! 约束所选节点 X 方向位移自由度
D, ALL, UY	! 约束所选节点 Y 方向位移自由度
ALLSEL	! 选中所有对象

(6) 保存模型退出前处理器。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【Finish】**, 单击常用工具条上的 **【SAVE DB】** 按钮, 保存有限元模型, 退出前处理模块。

8.2.2 静力分析

在计算部分, 分别对水下四层导向孔和三层导向孔两种模型分别计算。

(1) 设置分析类型。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【New Analysis】**,

弹出如图 6.19 所示分析类型选择对话框, 选择 “Static”, 单击 **【OK】** 按钮退出。

(2) 定义边界条件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Displacement】 > 【On Nodes】**, 弹出节点拾取对话框, 利用鼠标在图形显示区域选中导管底端节点, 单击 **【OK】** 按钮, 弹出自由度设置对话框, 选择 “All DOFs”, 单击 **【OK】** 按钮, 继续选中顶端节点约束其 “UX, UY” 方向自由度。命令流如下:

```
NSEL, S, LOC, Z, -120.63      ! 选中 Z = -120.63 处的节点
D, ALL, ALL                  ! 约束所选节点 X 方向位移自由度
ALLSEL                      ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, 38          ! 选中 Z = 38 处的节点
D, ALL, UX                   ! 约束所选节点 X 方向位移自由度
D, ALL, UY                   ! 约束所选节点 Y 方向位移自由度
ALLSEL                      ! 选中所有对象
```

(3) 施加载荷。

① 定义导管顶部载荷。

单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Force/Moment】 > 【On Nodes】**, 弹出节点拾取对话框, 用鼠标在图形显示区域拾取导管顶部节点, 单击 **【OK】** 按钮, 弹出 “Apply F/M on Nodes” 属性值设置对话框, 在 **【Direction of force/moment】** 中选择 “Fz”, 在 **【Force/moment value】** 中输入 “-3E5”, 单击 **【OK】** 按钮。

② 定义风载荷。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Force/Moment】 > 【On Nodes】**, 弹出 “Apply F/M on Nodes” 对象拾取对话框, 选择 “Box”, 用鼠标在图形显示区域拾取水面以上所有节点, 单击 **【OK】** 按钮, 弹出 “Apply F/M on Nodes” 属性值设置对话框, 在 **【Direction of force/moment】** 中选择 **【Fx】**, 在 **【Force/moment value】** 中输入 “18987/38” (共 38 个节点), 单击 **【OK】** 按钮退出。

③ 定义重力场。

单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Inertia】 > 【Gravity】 > 【Global】**, 弹出 “Apply (Gravitational) Acceleration” 属性值设置对话框, 在 “ACELX, ACELY, ACELZ” 中依次输入 “0, 0, 9.8”。

(4) 求解。

通过菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Solve】 > 【Current LS】**, 对问题进行求解。在求解过程中会看到图示的求解收敛曲线。在求解结束后, 弹出 “Solution is done!” 信息提示框, 关闭。单击 **【Main Menu】 > 【Finish】** 菜单项, 退出求解计算模块。

(5) 静力结果分析。

① 读入结果文件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Read Results】**, 单击 **【Last Set】**, 读入最后一个子步的结果文件。

② 绘制结构整体变形图。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Plot Results】 > 【Deformed Shape】**，在弹出的对话框中选择 **【Def shape only】**，显示结构整体变形图，如图 8.4 和图 8.5 所示，其中图 8.4 为水下四层导向孔，图 8.5 为水下三层导向孔。

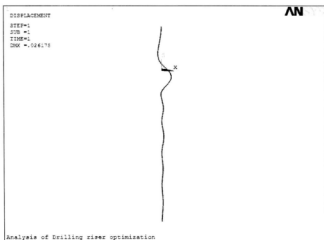


图 8.4 结构整体变形图（水下四层导向孔）

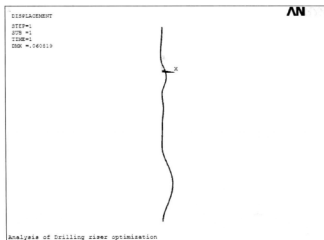


图 8.5 结构整体变形图（水下三层导向孔）

③ 绘制结构节点位移等值线云图。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Plot Results】 > 【Contour Plot】 > 【Nodal Solu】**，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，依次单击 **【Nodal Solution】 > 【DOF Solution】 > 【Displacement vector sum】**，单击 **【OK】** 按钮，显示如图 8.6 与图 8.7 所示的结构节点位移等值线云图。从图中可以看出，水下四层导向孔结构发生最大位移

的位于水面以下 5m 左右，数值为 0.0262m，水下三层导向孔结构发生最大位移的位于水面以下 93m 左右，即原来第四层导向孔位置附近，数值为 0.0608m。由此可以看出，如果去掉位于水下 90.36m 处的导向孔，整个结构的横向位移极值为 6.08cm。

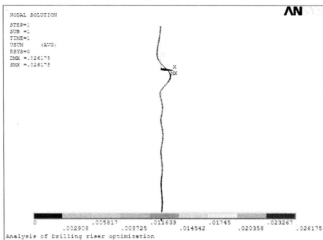


图 8.6 节点位移等值线云图（水下四层导向孔）

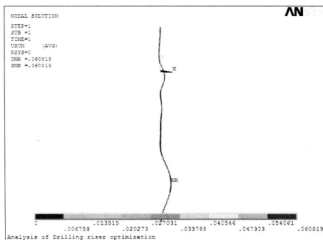


图 8.7 节点位移等值线云图（水下三层导向孔）

④绘制单元应力等值线云图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Element Solu】，弹出“Contour Element Solution Data”对话框，依次单击【Element Solution】>【Stress】>【von Mises stress】，单击【OK】按钮，如图 8.8 和图 8.9 所示分别为水下四层和水下三层导向孔结构的米塞斯等效应力云图。

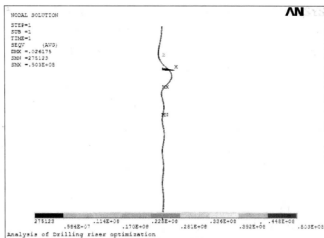


图 8.8 单元等效应力等值线云图 (水下四层导向孔)

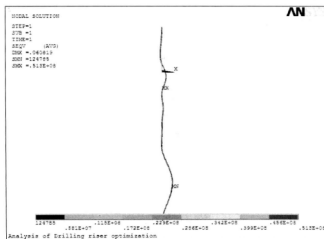


图 8.9 单元等效应力等值线云图 (水下三层导向孔)

由以上两个图可以看出, 水下四层导向孔和水下三层导向孔结构的最大米塞斯应力都位于水下第一层导向孔位置附近, 前者最大值为 50.3MPa, 后者为 51.3MPa, 由此可见, 两者相差很小, 但从强度角度来看, 完全可以去掉水下第四层导向孔。

③定义单元表项。

通过单元输出项所规定的规则 (可以在 ANSYS 帮助系统中查看对应单元类型的输出规则) 定义需要查看的结果项, 可以提取数据进行分析。下面进行单元等效应力及弯矩的定义。

选择菜单路径项 **【Main Menu】>【General Postproc】>【Element Table】>【Define Table】**, 弹出“Element Table Data”对话框, 单击 **【Add】** 按钮, 在弹出对话框的 **【Lab】** 选项后的文本框中输入“MOMENT_I”, 定义单元 I 节点的弯矩, 在 **【Item, Comp】** 选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“SMISC,”, 接着在其

下面的文本框中将内容补充为“SMISC, 5”, 单击【Apply】按钮, 继续在【Lab】选项后的文本框中输入“MOMENT_I”, 定义单元 I 节点的弯矩, 在【Item, Comp】选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“SMISC,”, 接着在其下面的文本框中将内容补充为“SMISC, 11”, 单击【Apply】按钮。

继续定义单元的等效应力, 弹出对话框的【Lab】选项后的文本框中输入“STRESS_I”, 定义单元 I 节点等效应力, 在【Item, Comp】选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“NMISC,”, 接着在其下面的文本框中将内容补充为“NMISC, 15”, 单击【Apply】按钮, 继续在【Lab】选项后的文本框中输入“STRESS_J”, 定义单元 J 节点的等效应力, 在【Item, Comp】选项后的左下拉框选中“By sequence num”, 然后在右边的下拉列表框中选择“NMISC,”, 接着在其下面的文本框中将内容补充为“NMISC, 55”, 单击【OK】按钮退出。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Line Elem Res】, 弹出“Plot Line-Element Results”对话框, 在【LabI】选项后的下拉列表选中“MOMENT_I”, 在【LabJ】选项后的下拉列表选中“MOMENT_J”, 其他选项默认, 单击【OK】按钮, 显示出如图 8.10 和图 8.11 所示的单元弯矩分布云图。由图中可以看出, 结构最大弯矩出现在水面附近。

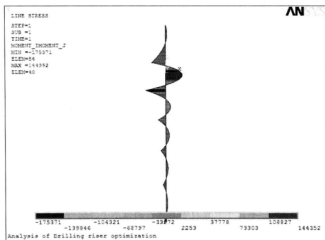


图 8.10 结构弯矩分布图 (水下四层导向孔)

从图 8.10 和图 8.11 中可以看出, 两种结构的弯矩分布大致相同, 其最大值都分布在水面处附近, 水下三层导向孔结构的极限弯矩相比水下四层导向孔结构有所减小。分别为 142988N·m 和 144325N·m。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Line Elem Res】, 弹出“Plot Line-Element Results”对话框, 在【LabI】选项后的下拉列表选中“STRESS_I”, 在【LabJ】选项后的下拉列表选中“STRESS_J”, 其他选项默认, 单击【OK】按钮, 显示出如图 8.12 和图 8.13 所示的单元应力分布云图。由图中可以看出, 结构最大弯矩出现在水面附近。

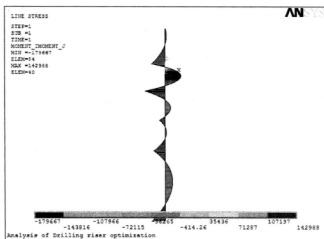


图 8.11 结构弯矩分布图 (水下三层导向孔)

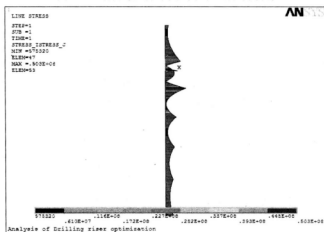


图 8.12 结构应力分布图 (水下四层导向孔)

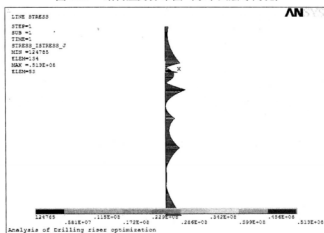


图 8.13 结构应力分布图 (水下三层导向孔)

⑥列表显示所定义的单元表项。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Element Table】 > 【List Elem Table】**，弹出如图 8.14 所示的对话框，在右侧下拉列表框中选中“MOMENT_I, MOMENT_J, STRESS_I, STRESS_J”，单击 **【OK】** 按钮。

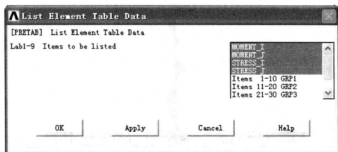


图 8.14 单元表项设置

8.2.3 结构模态分析

(1) 模型修改。

打开 ANSYS 程序主界面，导入静力分析时所建立的平台桩腿建模部分，选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Element Type】 > 【Add/Edit/Delete】**，弹出 **【Element Type】** 对话框，单击 **【Add】** 按钮，定义 MASS21 为 3 号单元类型，定义实常数“R, 3,, 3E4”。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Modeling】 > 【Create】 > 【Elements】 > 【Elem Attributes】**，弹出单元属性设置对话框，选择单元类型为“3 MASS21”，实常数为“24”，其他默认，单击 **【OK】** 退出。选择 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Modeling】 > 【Create】 > 【Elements】 > 【Auto Numbered】 > 【Thru Nodes】**，弹出的节点拾取对话框，在图形显示区域中，用鼠标选中桩腿最顶端的节点，单击 **【OK】** 按钮，集中质量单元创建完成，模型修改完成。

(2) 设置位移约束。

进行结构模态分析时，为了略去结构无关的振型，对导管结构除导向孔位置以外的所有节点只保留 X 和 ROTY 两个自由度。

(3) 设定模态分析类型。

重新进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【New Analysis】**，设置分析类型为 **【Modal】**。

(4) 设置分析选项。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【Analysis Option】**，弹出“Modal Analysis”对话框，模态提取方法采用 **【Block Lanczos】**，提取模态数设为“6”。

(5) 扩展模态设置。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Load Step Opts】 > 【ExpansionPass】 > 【Single Expand】 > 【Expand Modes】**，弹出“Expand Nodes”对话框，模态扩展数设为“6”。

(6) 模态分析求解。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Solve】>【Current LS】，弹出“Solve Current Load Step”对话框，单击【OK】，开始计算模态解。求解完毕后，在“Note”对话框中显示“Solution is done！”，单击【Close】关闭对话框。

(7) 观察模态分析结果。

①观察模型固有频率。

进入通用后处理器 POST1，选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Results Summary】，观察模型的固有频率，结果如表 8.1 所示。

表 8.1 结构固有频率

振型		一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
频率 (Hz)	水下四层	0.3133	0.3964	1.7454	2.1513	2.4946	2.8426
	水下三层	0.0988	0.3963	0.6498	1.7677	2.1662	2.5886

②读入结果文件。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Read Results】>【First Set】，读入第 1 载荷子步的计算结果。

③观察模态振型。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Deform Shape】，显示一阶模态振型，如图 8.15 所示。

为了便于观察，建议选择菜单路径项【Utility Menu】>【PlotCtrls】>【Style】>【Size and Shape】，在“Size and Shape”对话框打开“Display of element shapes based on real constant descriptions”选项，以便在图形对话框以单元实际截面形状显示模型的模态振型。

重复上述操作可以得出其他五阶模态振型，如图 8.16 至 8.20 所示，图 8.21 至 8.26 所示为水下三层导向孔前六阶模态图。

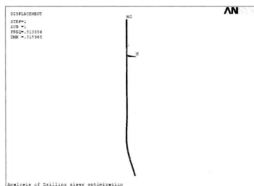


图 8.15 一阶模态（水下四层导向孔）



图 8.16 二阶模态（水下四层导向孔）

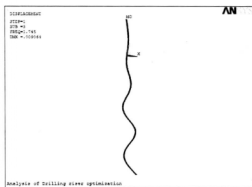


图 8.17 三阶模态 (水下四层导向孔)

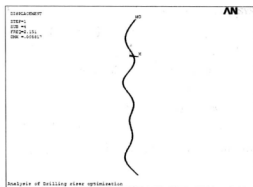


图 8.18 四阶模态 (水下四层导向孔)

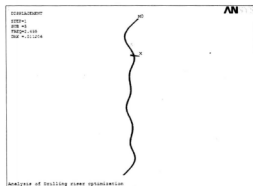


图 8.19 五阶模态 (水下四层导向孔)

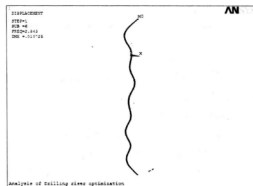


图 8.20 六阶模态 (水下四层导向孔)

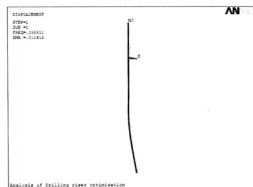


图 8.21 一阶模态 (水下三层导向孔)

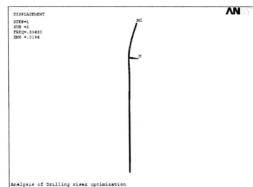


图 8.22 二阶模态 (水下三层导向孔)

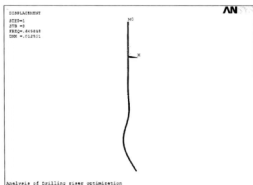


图 8.23 三阶模态 (水下三层导向孔)

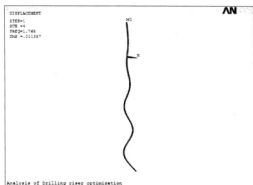


图 8.24 四阶模态 (水下三层导向孔)

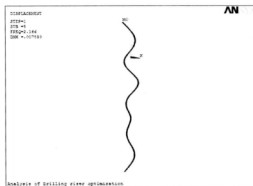


图 8-25 五阶模态 (水下三层导向孔)

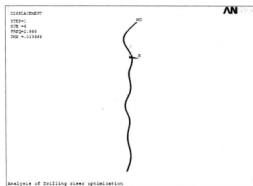


图 8.26 六阶模态 (水下三层导向孔)

由图可知,水下四层和水下三层导向孔两种结构的前两阶振型相同,二者自振频率相差很小。因此,从计算结果可以看出,去掉水下第四层导向孔对隔水导管的整体结构强度和性能影响不大,是可以满足工程需要的。

8.3 本章小结

本章主要介绍了深水隔水导管与导向孔之间的相互作用模拟分析。首先对隔水导管及其导向孔进行简要介绍,接着介绍二者之间相互作用的力学分析模拟方法及在 ANSYS 中的实现。通过工程实例详细介绍了隔水导管与导向孔在进行力学分析时的具体操作过程,并对工程实例进行了不同工况条件下的优化计算,为实际工程施工提供了理论依据。通过本章的学习,读者可以掌握类似结构的处理方法和计算过程。

附录:本章实例 APDL 建模及分析命令流

```
*****
某油田隔水导管与导向孔相互作用分析命令流
*****
/FILNAME, Drilling riser optimization, 1      !设置工作文件名
```

```

/TITLE, Analysis of Drilling riser optimization !设置图形显示区域名
!***** 定义环境载荷参数
Dwater=117.63 !水深
H_wave=12.8 !波高
T_wave=13.1 !波周期
V_surface=2.21 !水面处海流速度
V_middle=1.32 !中部海流速度
V_bottom=0.74 !底部海流速度
!***** 定义导管参数
OD=0.508 !导管外径
TW=0.0254 !导管壁厚
!***** 定义桩顶载及风载
F_top=-3e5 !井口压载
F_wind=18978 !风载荷
!***** 前处理过程
/PREP7 !进入前处理
ET, 1, PIPE16 !定义1号单元类型 PIPE16
ET, 2, PIPE59 !定义2号单元类型 PIPE59
R, 1, 0.508, 0.0254 !定义1号实常数 (针对 PIPE16 单元)
R, 2, 0.508, 0.0254, 0.7, 2.0, 1030, 0, !定义2号实常数 (针对 PIPE59 单元)
MP, EX, 1, 2.1E11 !设置弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3 !设置泊松比
MP, DENS, 1, 7850 !设置密度
TBDE, WATE, 1 !设置波浪参数 Water Table
TB, WATE, 1,, 0 !Water Table
TBMODIF, 1, 1, 2 !选择 Stokes 五阶波理论
TBMODIF, 1, 2, 0 !波流耦合作用方式
TBMODIF, 1, 3, Dwater !定义水深
TBMODIF, 1, 4, 1030 !海水密度
TBMODIF, 1, 5, 0 !波浪作用方向
TBMODIF, 2, 1, -Dwater !底部坐标
TBMODIF, 2, 2, V_bottom !底部流速
TBMODIF, 2, 3, 0 !底部海流作用方向
TBMODIF, 2, 4, -Dwater/2 !中部坐标
TBMODIF, 2, 5, V_middle !中部流速
TBMODIF, 2, 6, 0 !中部海流作用方向
TBMODIF, 3, 1, 0 !水面坐标
TBMODIF, 3, 2, V_surface !海面流速
TBMODIF, 3, 3, 0 !表面海流作用方向
TBMODIF, 14, 1, H_wave !波高
TBMODIF, 14, 2, T_wave !波周期
TBMODIF, 14, 3, 43 !波浪相位角
N, 1, 0, 0, 38 !建立1号节点
N, 31, 0, 0, 7.9 !建立31号节点
FILL !在1号和31号节点之间生成2~30号节点
N, 39, 0, 0, 0 !建立39号节点

```

```

FILL                                ! 在 31 号和 39 号节点之间生成 2~38 号节点
N, 54, 0, 0, -14.6                 ! 建立 54 号节点
FILL                                ! 在 39 号和 54 号节点之间生成 40~53 号节点
N, 78, 0, 0, -38.6                 ! 建立 78 号节点
FILL                                ! 在 54 号和 78 号节点之间生成 55~77 号节点
N, 103, 0, 0, -63.6                ! 建立 103 号节点
FILL                                ! 在 78 号和 103 号节点之间生成 79~102 号节点
N, 130, 0, 0, -90.6                ! 建立 130 号节点
FILL                                ! 在 103 号和 130 号节点之间生成 104~129 号节点
N, 157, 0, 0, -117.63              ! 建立 157 号节点
FILL                                ! 在 130 号和 157 号节点之间生成 131~156 号节点
N, 160, 0, 0, -120.63              ! 建立 160 号节点
FILL                                ! 在 157 号和 160 号节点之间生成 158、159 号节点
TYPE, 2                             ! 选中 2 号单元类型
REAL, 2                             ! 选中 2 号单元类型
MAT, 1                              ! 选中 1 号材料模型
*DO, I, 1, 156, 1                  ! 参数化建模
E, I, I+1                           ! 通过相邻节点建立单元模型
*ENDDO                               ! 完成泥线以上 PIPE59 单元模型
TYPE, 1                             ! 选中 1 号单元类型
REAL, 1                             ! 选中 1 号单元类型
MAT, 1                              ! 选中 1 号材料模型
*DO, I, 157, 159, 1               ! 参数化建模
E, I, I+1                           ! 通过相邻节点建立单元模型
*ENDDO                               ! 完成泥线以下 PIPE16 单元
NSSEL, S, LOC, Z, 7.9              ! 选中 Z=7.9 处的节点
NSSEL, A, LOC, Z, -14.6            ! 继续选中 Z=-14.6 处的节点
NSSEL, A, LOC, Z, -38.6            ! 继续选中 Z=-38.6 处的节点
NSSEL, A, LOC, Z, -63.6            ! 继续选中 Z=-63.6 处的节点
!NSSEL, A, LOC, Z, -90.6           ! 继续选中 Z=-90.6 处的节点 (选择性约束)
D, ALL, UX                          ! 约束所选节点 X 方向位移自由度
D, ALL, UY                          ! 约束所选节点 Y 方向位移自由度
ALLSEL                              ! 选中所有对象
SAVE                                ! 保存模型
FINISH                              ! 退出前处理
!***** 求解计算过程
/SOLU                               ! 进入求解计算模块
ANTYPE, 0                           ! 设置求解类型为结构静力分析
NSSEL, S, LOC, Z, -120.63          ! 选中 Z=-120.63 处的节点
D, ALL, ALL                         ! 约束所选节点 X 方向位移自由度
ALLSEL                              ! 选中所有对象
NSSEL, S, LOC, Z, 38               ! 选中 Z=38 处的节点
D, ALL, UX                          ! 约束所选节点 X 方向位移自由度
D, ALL, UY                          ! 约束所选节点 Y 方向位移自由度
ALLSEL                              ! 选中所有对象
NSSEL, S, LOC, Z, 38               ! 选中 Z=38 处的节点

```



```

F, ALL, FZ, F_top          ! 施加井口压载
ALLSEL                     ! 选中所有对象
NSEL, S, LOC, Z, 1, 38     ! 选中 Z = 1~38 范围内的所有节点
F, ALL, FX, F_wind/38      ! 施加风载
ALLSEL                     ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8            ! 施加重力载荷
SOLVE                      ! 执行求解
SAVE                       ! 保存求解结果
FINISH                     ! 退出求解计算模块

!***** 静力分析后处理过程
/POST1                     ! 进入通用后处理器
SET, LAST                  ! 读入计算结果文件
/ESHAPE, 1.0               ! 打开模型形状开关
PLDISP, 0                  ! 绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1.0     ! 绘制结构位移等值图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0     ! 绘制结构等效应力分布云图
PLNSOL, EPTO, EQV, 0, 1.0  ! 绘制结构等效应变分布云图
ETABLE, MOMENT_I, SMISC, 5 ! 定义 I 端节点弯矩
ETABLE, MOMENT_J, SMISC, 11 ! 定义 J 端节点弯矩
PLLS, MOMENT_I, MOMENT_J, 1, 0 ! 绘制弯矩图
ETABLE, STRESS_I, NMISC, 15 ! 定义 I 端节点应力
ETABLE, STRESS_J, NMISC, 55 ! 定义 J 端节点应力
PLLS, STRESS_I, STRESS_J, 1, 0 ! 绘制应力分布图
FINISH                     ! 退出后处理器

!***** 模态分析过程
/PREP7                     ! 重新进入前处理
ET, 3, MASS21              ! 定义 3 号单元类型为 MASS21
R, 3,, 3E4                 ! 定义 3 号实常数 (针对 MASS21 单元)
TYPE, 3                    ! 选择 3 号单元类型
REAL, 3                    ! 选择 3 号实常数
E, 1                        ! 通过节点 1 建立 MASS21 实体单元
NSEL, S, LOC, Z, -120.6, -90 ! 选中底端与水下第四层导向孔之间的所有节点
NSEL, A, LOC, Z, -90, -64    ! 继续选中水下第四层导向孔与第三层之间的所有节点
NSEL, A, LOC, Z, -63, -39    ! 继续选中水下第三层导向孔与第二层之间的所有节点
NSEL, A, LOC, Z, -38, -15    ! 继续选中水下第二层导向孔与第一层之间的所有节点
NSEL, A, LOC, Z, -14, 7      ! 继续选中水下第一层导向孔与水上导向孔之间的所有节点
NSEL, A, LOC, Z, 8, 37       ! 继续选中水上导向孔与顶部的所有节点
D, ALL, UY                 ! 约束所选节点 Y 方向的位移自由度
D, ALL, UZ                 ! 约束所选节点 Z 方向的位移自由度
D, ALL, ROTX               ! 约束所选节点 X 方向的转动自由度
D, ALL, ROTZ               ! 约束所选节点 Z 方向的转动自由度
ALLSEL                     ! 选中所有对象
NSEL, Z, LOC, Z, -120.63     ! 选中底端节点
D, ALL, ALL                 ! 约束其全部自由度
ALLSEL                     ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8            ! 施加重力载荷

```

```
/SOLU                                ! 进入求解模块
ANTYPE, MODAL                        ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT, LANB, 6                      ! 模态分析选项
MXPAND, 6                            ! 设置扩展 4 阶模态
SOLVE                                ! 开始模态求解
SAVE                                  ! 保存求解结果
FINISH                                ! 退出求解模块

!***** 模态分析后处理
/POST1                                ! 进入通用后处理器
ESHAPE, 1.0                          ! 打开结构形状开关
SET, LIST                            ! 列表显示结构自振频率计算结果
SET, FIRST                           ! 读入一阶模态
PLDISP, 0                            ! 显示结构一阶模态
SET, NEXT                            ! 读入二阶模态
PLDISP, 0                            ! 显示结构二阶模态
SET, NEXT                            ! 读入三阶模态
PLDISP, 0                            ! 显示结构三阶模态
SET, NEXT                            ! 读入四阶模态
PLDISP, 0                            ! 显示结构四阶模态
FINISH                                ! 退出后处理模块
```

9 导管架平台整体结构分析

◇ 本章导读

本章以海洋石油导管架平台为对象,采用 GUI 菜单操作和命令流相结合的方式,详细介绍了 ANSYS 建立海洋平台有限元模型的全过程,针对海洋平台的各种环境载荷,采用相应的 ANSYS 分析类型分别进行计算,目的是希望通过具体实例,加深读者对 ANSYS 结构整体分析的理解,以及对复杂海洋结构物分析的方法。

本章主要包括如下四个内容:

- 平台整体模型的建立。
- 波流耦合作用下导管架平台整体结构静力分析。
- 导管架平台整体结构模态分析。
- 波浪作用下平台结构瞬态动力分析。

海洋平台是高出海平面的一种海洋工程结构。前已述及,海洋平台按结构类型分为固定式平台和移动式平台。固定式平台又可以分为导管架型、塔型和重力型等各种结构形式。图 9.1 所示是导管架平台的工程实例。移动式平台则包括自升式、半潜式、浮船式和张力腿式等结构形式。由于海洋平台工作环境是在近海海面上,受到风浪流等载荷的作用,因此对其安全性和可靠性的分析是确保其在服役年限内正常使用的重要环节。本章的目标就是通过一个 ANSYS 导管架平台的分析实例,使得读者能够了解和学习固定式导管架海洋平台及类似的结构建模和有限元分析方法。

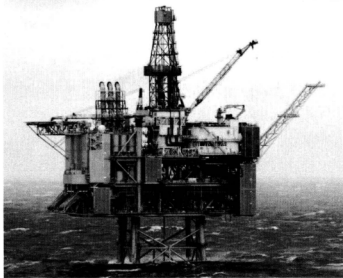


图 9.1 导管架平台

9.1 平台整体模型建立

本节结合工程实例以导管架平台为对象,按照结构特点分析、单元类型选择、材料参数设定、建立几何模型、划分有限元网格的顺序,详细介绍 ANSYS 建立海洋导管架平台有限元模型的过程。建模过程中,采用 APDL 命令流和 GUI 菜单相结合的方式,目的是使读者具体体会这两种建模方式各自的特点。

9.1.1 工程实例基本数据

(1) 环境条件。

水深 45m; 风速 43.6m/s; 有效波高 14.8m; 有效波周期 10.8s; 海面流速 2.35m/s; 中部流速 1.96m/s; 底部流速 1.60m/s; 海冰厚度 32cm; 抗压强度 1990kPa。

(2) 平台结构几何参数。

平台结构几何参数见表 9.1。

表 9.1 平台几何参数

序号	名 称	直 径 (m)		壁 厚 (m)	
1	泥面上导管架主导管	1.2		0.050	
2	泥面下导管架主导管	1.2		0.050	
3	甲板部分主导管	0.78		0.0381	
3	导管架层间横支撑	0.78		0.0381	
4	导管架斜撑杆	0.508		0.0254	
5	甲板部分梁结构	截面积 (m ²)	截面长 (m)	截面宽 (m)	
		0.16	0.4	0.4	
6	甲板	厚度 (m)		长 × 宽 (m × m)	
		0.025		30 × 20	

9.1.2 导管架平台结构特点

本节主要是建立如图 9.2 所示的四腿导管架平台。

(1) 总体特点。

导管架平台属于固定式平台,由上层平台结构和下部导管架结构组成,导管架底端通过桩基础固定。上层平台结构支撑框架和甲板,主要提供生产和生活的场地,其外形为矩形,尺寸为 30m × 20m,水面至顶层甲板高度为 15m。

下部导管架由一系列钢管焊接而成,主体是 4 根主导管,其间用细管件作为撑杆,组成空间塔架结构,桩基础通过主导管插入海底泥土。

(2) 单元类型选择和参数设定。

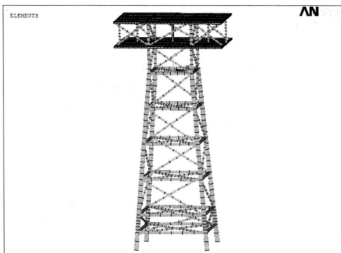


图 9.2 导管架平台模型

整个导管架平台模型采用四种单元类型：PIPE20、PIPE59、BEAM4 及 SHELL43。下部导管架和上部甲板框架的主要竖向支撑构件采用 PIPE59 单元，泥线以下采用 PIPE20 单元，甲板平面的框架梁采用 BEAM4 单元，水平甲板采用 SHELL43 单元。

① PIPE20 单元截面由外径和壁厚确定；

② PIPE59 单元截面由外径、壁厚、法向曳力系数、法向惯性系数、内部液体密度、外部附着物密度、外部附着物厚度确定；

③ BEAM4 单元截面形式选用矩形，单元参数包括截面的高度、宽度、面积和截面惯性矩；

④ SHELL43 单元参数包括四节点处的厚度。

整个模型采用同一种钢材，弹性模量为 $2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ，泊松比为 0.3，密度为 7850 kg/m^3 ，材质为 D36，屈服强度为 360 MPa 。

(3) 建模步骤。

结构的建模步骤主要分为几何模型的建立和划分网格建立有限元模型。

① 建立几何模型，按照平台各节点的具体坐标建立关键点，连接关键点生成线，从而建立平台结构的基本框架，创建甲板平面，完成几何模型的建立。

② 建立有限元模型，对几何模型进行网格划分，形成计算分析的有限元模型。

9.1.3 平台几何模型的建立

本节主要以命令流方式进行介绍，同时也给出相应的 GUI 操作的菜单路径，建模过程中，所有数据输入统一采用国际单位制单位。下面对建立几何模型的各步骤及其注意事项进行具体介绍，同时给出一些关键步骤和程序执行结果。

(1) 设置工作环境。

进入 ANSYS/Multiphysics 的程序界面后，通过常用菜单路径项 **【Utility Menu】 > 【File】 > 【Change Jobname】**，指定分析的工作名称为“Platform”，将“New log and error files？”选项设置为 **【yes】**，单击 **【OK】** 按钮，通过菜单项 **【Utility Menu】 > 【File】 >**

【Change Title】，指定图形显示区域的标题为“Analysis of Platform”。在命令流对话框中输入“/UNIT, SI”，定义国际单位制。

(2) 定义单元类型。

单击菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Element Type】>【Add/Edit/Delete】，定义4种单元类型，选取 PIPE20 为1号单元，PIPE59 为2号单元，BEAM4 为3号单元，SHELL43 为4号单元。操作命令如下：

```
ET, 1, PIPE20          ! 定义1号单元 PIPE20
ET, 2, PIPE59          ! 定义2号单元 PIPE59
ET, 3, BEAM4           ! 定义3号单元 BEAM4
ET, 4, SHELL43         ! 定义4号单元 SHELL43
```

(3) 定义单元实常数。

单击菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Real Constants】>【Add/Edit/Delete】，定义6组实常数，其中实常数1针对 PIPE20 单元，实常数2~4 针对 PIPE59 单元，实常数5 针对 BEAM4 单元，实常数6 针对 SHELL63 单元。命令流如下：

```
R, 1, 1.2, 0.050          ! 定义1号实常数 (PIPE20)
R, 2, 1.2, 0.050, 0.7, 2.0, 1030, 0 ! 定义2号实常数 (PIPE59)
R, 3, 0.78, 0.0381, 0.7, 2.0, 1030, 0 ! 定义3号实常数 (PIPE59)
R, 4, 0.508, 0.0254, 0.7, 2.0, 1030, 0 ! 定义4号实常数 (PIPE59)
R, 5, 0.06, 0.0002, 0.00045, 0.3, 0.2 ! 定义5号实常数 (BEAM4)
R, 6, 0.02, 0.02, 0.02, 0.02          ! 定义6号实常数 (SHELL43)
```

(4) 定义材料参数。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Material Props】>【Material Models】，在出现的“Define Material Model Behavior”对话框的右侧，依次选择菜单路径项【Structural】>【Nonlinear】>【Inelastic】>【Rate Independent】>【Isotropic Mardening Plasticity】>【Mises Plasticity】>【Bilinear】，弹出“Note”对话框，单击【确定】按钮，设置材料的线性阶段的弹性模量及泊松比，在出现的对话框【EX】项后的文本框中输入“2.1E11”，在【PRXY】项后的文本框中输入“0.3”。然后单击【OK】按钮，弹出如图6.8所示的材料屈服强度设置对话框，在【Yield Stss】项后的文本框中输入“360E6”，在【Tang Mod】项后的文本框中输入“0”，表示采用的材料为理想弹塑性模型。再次单击【Structural】>【Density】，弹出密度设置对话框，在【DENS】选项后的文本框中输入“7850”，单击【OK】。继续单击【Fluids】>【Water Table】设置环境载荷参数，这部分的定义方法与第4章中相同，在此不再赘述，具体设置见本章附录。

(5) 几何模型建立。

建立海洋平台的几何模型主要分为三个步骤，即创建关键点、连线构成结构框架和生成甲板平面。下面将介绍海洋平台几何模型的创建过程。

① 创建关键点。

通过菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Modeling】>【Create】>【Keypoint】>【In Active CS】创建关键点。操作命令如下：

```
K, NPT, X, Y, Z          ! 通过定义三个坐标值生成关键点
```

完整的关键点创建过程见本章附录部分命令流，建立关键点之后的模型如图9.3所示。

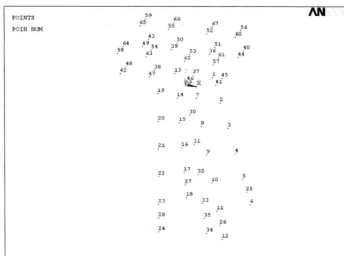


图 9.3 平台关键点

②通过关键点创建线构成结构框架。

连接关键点生成平台结构的杆系框架，通过菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Modeling】 > 【Create】 > 【Lines】 > 【Straight Line】**，由关键点创建线。操作命令流如下：

L, P1, P2 ! 通过关键点创建线

完整的线创建命令流见本章附录。通过关键点创立线框架之后的模型如图 9.4 所示。

③生成甲板平面。

每层甲板平面由 9 个矩形平面组成，矩形位置和尺寸由甲板关键点坐标确定。通过菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Preprocessor】 > 【Modeling】 > 【Create】 > 【Area】 > 【Arbitrary】 > 【Through Kps】**。操作命令流如下：

A, P1, P2, P3, P4 ! 由关键点生成面

完整的平面创建过程详见本章附录。生成甲板平面之后的模型如图 9.5 所示。

到此为止，海洋平台的几何模型创建完毕，在 ANSYS Toolbar 上单击 **【SAVE_DB】** 按钮，保存模型到数据文件。

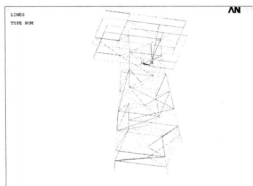


图 9.4 模型框架

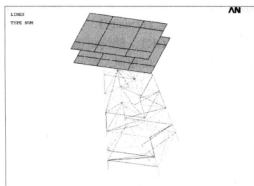


图 9.5 生成甲板面

9.1.4 平台有限元模型划分

在第2步的单元类型定义中,定义了 PIPE20、PIPE59、BEAM4、SHELL43 四种单元类型,分别用来划分导管架、甲板平面梁框架和甲板,下面按照这四种单元的顺序对结构模型进行划分网格生成有限元模型。

(1) 导管架网格划分。

PIPE20 和 PIPE59 都是用来划分导管架结构,PIPE20 选用 1 号材料属性,单元截面由外径和壁厚确定;PIPE59 采用 2 号材料属性,由外径、壁厚及一系列流体参数确定单元属性。不同规格的杆件需要结合相应的实常数,所有被划分线段的网格划分数 NDIV 为 1。通过菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【MeshTool】。操作的命令流如下:

```
LSEL, S,,, VMIN, VMAX      !通过线号选取线
LATT, MAT, REAL, TYPE      !为已选取的线赋予材料、实常数、单元类型编号
LESIZE, ALL,,, NDIV        !对已选取的线划分份数
LMESH, ALL                  !网格划分
```

(2) 甲板平面梁网格划分。

BEAM4 单元用来划分甲板梁。所有 BEAM4 单元采用 1 号材料属性,5 号实常数,线段网格划分段数为 3。通过菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【MeshTool】。命令流同导管架网格划分。

(3) 甲板平面网格划分。

SHELL63 单元用来划分甲板平面。所有 SHELL43 单元采用 1 号材料属性,6 号实常数。通过菜单路径项【Main Menu】>【Preprocessor】>【Meshing】>【MeshTool】。操作命令流如下:

```
ASEL, S,,, ALL              !选取面
AATT, 1, 6, 3               !为已选取的面赋予材料、实常数、单元类型编号
AMEH, ALL                   !面单元划分
```

至此,海洋平台结构的有限元模型建立完毕。

为了便于观察,选取菜单路径项【Utility Menu】>【PlotCtrls】>【Style】>【Size and Shape】,弹出“Size and Shape”对话框,打开“Display of element shapes on real constant descriptions”选项,模型将以实际形状显示。如图 9.6 所示。图中不同颜色代表不同的实常数。在 ANSYS Toolbar 上单击【SAVE_DB】,保存模型到数据文件。

9.2 波流耦合作用下导管架平台整体结构静力分析

本节将在上一节建立的平台有限元模型基础上对平台进行静动力计算分析,所进行的是非线性求解,并将计算所得相应数据进行校核。模型的静力分析是利用前述相关章节所给出的载荷理论,考虑平台在风浪流作用下的结构静力分析。

9.2.1 波流耦合力极值

在对导管架平台进行整体静力分析之前,首先要对该结构进行波流耦合力极值进行搜

索,以求得相对应的波浪相位角。对于波浪相位角的搜索,一般是针对某一固定波高和周期的波浪而言的。当已知的波浪作用于结构物时,其作用力的大小与相位角紧密相关。按照前述相关章节所讲述的方法对平台整体结构进行相位角搜索。



图 9.6 导管架平台整体有限元模型

- (1) 模型导入: 读入上节所建立的导管架有限元模型到 ANSYS 程序。
- (2) 设置环境参数: 假设波流均沿 X 正向作用于平台结构, 将波浪相位角置空。
- (3) 设置边界条件: 为了方便结构反力的提取, 将结构最底端四节点进行自由度耦合并约束其中一个节点。如图 9.7 所示。

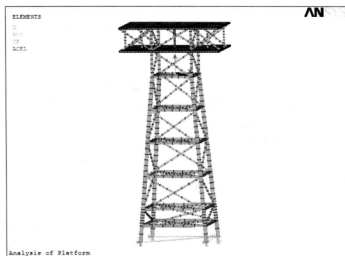


图 9.7 施加重力载荷及约束之后的模型

- (4) 进行搜索求解: 利用第 4 章有关程序进行求解。
- (5) 提取分析结果: 根据分析结果数据作出波流耦合力—相位角关系曲线, 如图 9.8 所

示。结合结果文件数据,可得出当波流耦合力最大值为 4913kN,相对应的相位角为 46° 。此相位角即作为静力分析时所输入的值。

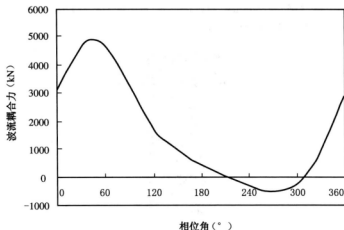


图 9.8 波流耦合力—相位角关系曲线

9.2.2 结构整体静力分析

(1) 设置分析类型。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Analysis Type】 > 【New Analysis】**, 选择 “Static”, 单击 **【OK】** 按钮退出。

(2) 定义位移边界条件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Displacement】 > 【On Nodes】**, 弹出节点拾取对话框, 在图形显示区域用鼠标将导管架底端四节点全部选上, 单击 **【OK】** 按钮, 弹出位移属性设置对话框, 选中 **【All DOFS】**, 单击 **【OK】** 按钮退出。

(3) 施加载荷。

①施加波流载荷: 按波流同方向作用于结构物, 波浪相位角为 46° 。

②定义重力场:

单击菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Inertia】 > 【Gravity】 > 【Global】**, 弹出 “Apply (Gravitational) Acceleration” 属性值设置对话框, 在 “ACELX, ACELY, ACELZ” 中依次输入 “0, 0, 9.8”。

(4) 静力分析求解。

通过菜单项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Solve】 > 【Current LS】**, 对问题进行求解。在求解过程中会看到图示的求解收敛曲线。在求解结束后, 弹出 “Solution is done!” 信息提示框, 关闭。单击 **【Main Menu】 > 【Finish】** 菜单项, 退出求解计算模块。

9.2.3 静力结果分析

(1) 读入结果文件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Read Results】**, 单击 **【Last**

Set】，读入最后一个子步的结果文件。

(2) 绘制结构整体变形图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Deformed Shape】，在弹出的对话框中选择【Def shape only】，显示结构整体变形图，如图 9.9 所示。

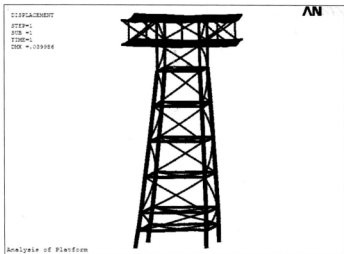


图 9.9 结构整体变形图

(3) 绘制结构节点位移等值线云图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Nodal Solu】，弹出“Contour Nodal Solution Data”对话框，依次单击【Nodal Solution】>【DOF Solution】>【Displacement vector sum】，单击【OK】按钮，显示如图 9.10 所示的结构节点位移等值线云图。从图中可以看出，结构发生最大位移的位置位于平台顶部，数值为 0.0398m。

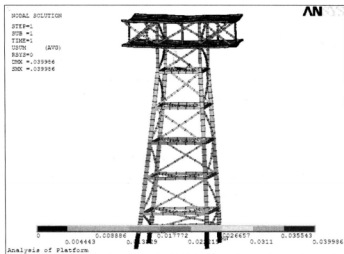


图 9.10 节点位移等值线云图

(4) 绘制单元应力等值线云图。

选择菜单路径项【Main Menu】>【General Postproc】>【Plot Results】>【Contour Plot】>【Element Solu】，弹出“Contour Element Solution Data”对话框，依次单击【Element Solution】>【Stress】>【von Mises stress】，单击【OK】按钮，如图 9.11 所示显示结构的米塞斯等效应力云图。由图可知，结构的最大应力为 117MPa，发生在桩腿底部位置。

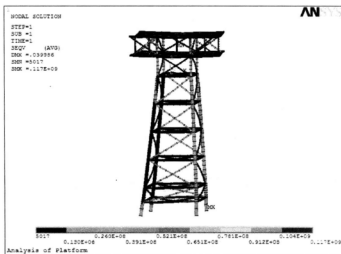


图 9.11 单元等效应力云图

9.3 导管架平台整体结构模态分析

模态分析是用来确定结构振动特性的一种技术，主要是求解结构的自然频率、振型以及振型参与系数等，它是所有动力学分析类型的最基础的内容，其分析结果可以作为瞬态动力分析、谐响应分析和谱分析等其他动力分析的基础。因此本节将对所建立的导管架平台进行模态分析。

9.3.1 结构模态计算

(1) 设定模态分析类型。

重新进入 ANSYS 求解器，选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【New Analysis】，设置分析类型为【Modal】。

(2) 设置分析选项。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【Analysis Option】，弹出“Modal Analysis”对话框，模态提取方法采用【Block Lanczos】，提取模态数设为“6”。

(3) 扩展模态设置。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Load Step Opts】>【ExpansionPass】>【Single Expand】>【Expand Modes】，弹出“Expand Nodes”对话框，模态扩展数设为“6”。

(4) 定义位移边界条件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Define Loads】 > 【Apply】 > 【Structural】 > 【Displacement】 > 【On Nodes】**，弹出节点拾取对话框，在图形显示区域用鼠标将导管架底端四节点全部选上，单击 **【OK】** 按钮，弹出位移属性设置对话框，选中 **【All DOFS】**，单击 **【OK】** 按钮退出。

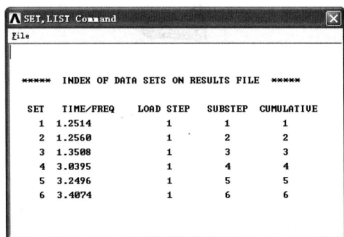
(5) 模态分析求解。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【Solution】 > 【Solve】 > 【Current LS】**，弹出“Solve Current Load Step”对话框，单击 **【OK】**，开始计算模态解。求解完毕后，在“Note”对话框中显示“Solution is done！”，单击 **【Close】** 关闭。

9.3.2 观察模态分析结果

(1) 观察模型固有频率。

进入通用后处理器 POST1，选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Results Summary】**，观察模型的固有频率，结果如图 9.12 所示。



SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	1.2514	1	1	1
2	1.2560	1	2	2
3	1.3508	1	3	3
4	3.0395	1	4	4
5	3.2496	1	5	5
6	3.4074	1	6	6

图 9.12 平台结构前六阶固有频率

(2) 读入结果文件。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Read Results】 > 【First Set】**，读入第 1 载荷子步的计算结果。

(3) 观察模态振型。

选择菜单路径项 **【Main Menu】 > 【General Postproc】 > 【Plot Results】 > 【Deformed Shape】**，显示一阶模态振型，如图 9.13 所示。

为了便于观察，建议选择菜单路径项 **【Utility Menu】 > 【PlotCtrls】 > 【Style】 > 【Size and Shape】**，在“Size and Shape”对话框打开“Display of element shapes based on real constant descriptions”选项，以便在图形界面以单元实际截面形状显示模型的模态振型。

重复上述操作可以得出其他五阶模态振型，如图 9.14 至 9.18 所示。

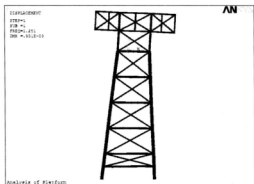


图 9.13 一阶模态

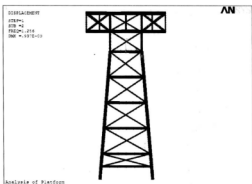


图 9.14 二阶模态

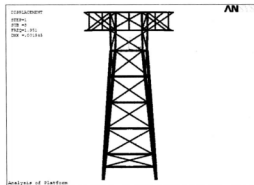


图 9.15 三阶模态

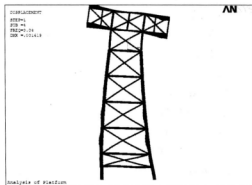


图 9.16 四阶模态

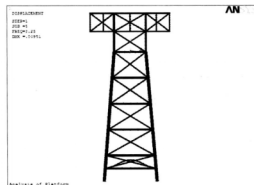


图 9.17 五阶模态

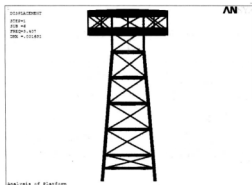


图 9.18 六阶模态

模态分析部分命令流如下:

```
/SOLU
```

```
ANTYPE, MODAL
```

```
MODOPT, LANB, 6
```

```
MXPAND, 6
```

! 进入求解模块

! 设置分析类型为模态分析

! 模态分析选项

! 设置扩展 6 阶模态

NSEL, S, LOC, Z, -50	! 选中 Z=-50 处的节点
D, ALL, ALL	! 约束所选节点全部自由度
ALLSEL	! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8	
SOLVE	! 开始模态求解
SAVE	! 保存求解结果
FINISH	! 退出求解模块
!***** 模态分析后处理	
/POST1	! 进入通用后处理器
ESHAPE, 1.0	! 打开结构形状开关
SET, LIST	! 列表显示结构自振频率计算结果
SET, FIRST	! 读入一阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构一阶模态
SET, NEXT	! 读入二阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构二阶模态
SET, NEXT	! 读入三阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构三阶模态
SET, NEXT	! 读入四阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构四阶模态
SET, NEXT	! 读入五阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构五阶模态
SET, NEXT	! 读入六阶模态
PLDISP, 0	! 显示结构六阶模态
FINISH	! 退出后处理模块

9.4 波浪作用下平台结构瞬态动力分析

瞬态动力学分析又称时间历程分析，用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的动力学响应，目的是得到结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力和力。

波浪力是一种所时间变化的载荷，对导管架平台的动力响应问题不可忽视。本节将进行波浪载荷作用下导管架平台的整体瞬态动力分析。

9.4.1 瞬态动力分析

进行瞬态动力分析所采用的结构有限元模型与模态分析时完全相同。由模态分析所得到的阻尼系数进行瞬态动力分析，时程分析取作用时间为 100s，时间间隔 0.2s。根据模态分析所得到前两阶固有频率可计算得到瑞利阻尼系数为： $\alpha=0.1575$ ， $\beta=2.5389 \times 10^{-3}$ 。

(1) 波流参数修改。

由于是分析波载载荷所引起的水动力效应，因此将波浪的相位角设置为 0° ，选择【Main Menu】>【Preprocessor】>【Material Props】>【Material Models】，在弹出的“Define

Material Model Behavior”对话框中,选择【Water Table】选项,单击“打开”,将原来静力分析所输入的波浪相位角 46° 改为 0° ,单击【OK】按钮退出。命令流如下:

TB, 81, 0 ! 修改 WATERTABLE 里的波浪相位角为 0°

(2) 求解选项设置。

① 设置求解类型。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【New Analysis】,弹出“Type of analysis”对话框,选中分析类型为【Transient】,分析方法选择【Full】,单击【OK】按钮退出。

② 求解控制项设置。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Analysis Type】>【Sol'n Controls】,弹出“Solution Controls”对话框,在【Basic】选项下的【Analysis Options】选中“Large Displacement Transient”,然后选中【Transient】,在【Damping Coefficients】选项下的【ALPHA】后输入“0.1575”,在【BETA】后输入“2.5389E-03”,其他选项默认,单击【OK】按钮退出,如图 7.12 所示。命令流如下:

ANTYPE, TRANS ! 设置求解类型为瞬态动力分析

ALPHAD, 0.1575 ! 设置阻尼系数 α

BETAD, 2.5389E-03 ! 设置阻尼系数 β

(3) 定义位移边界条件。

选择菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Displacement】>【On Nodes】,弹出节点拾取对话框,在图形显示区域用鼠标将导管架底端四节点全部选上,单击【OK】按钮,弹出位移属性设置对话框,选中【All DOFS】,单击【OK】按钮退出。

(4) 施加重力载荷。

单击菜单路径项【Main Menu】>【Solution】>【Define Loads】>【Apply】>【Structural】>【Inertia】>【Gravity】>【Global】,弹出“Apply (Gravitational) Acceleration”属性值设置对话框,在“ACELX, ACELY, ACELZ”中依次输入“0, 0, 9.8”。

(5) 求解。

设置时程分析结束时间为 100s,时间间隔为 0.2s。本部分利用命令流形式输入,如下:

*DO, I, 10E-12, 100, 0.2 ! 设定结束时间及子步时间开始循环计算

TIME, I ! 循环计算结束时间

OUTPES, ALL, ALL ! 输出结果设置

SOLVE, SAVE ! 执行求解并保存

*ENDDO ! 结束循环求解计算

9.4.2 动力分析结果处理

(1) 进入时间历程后处理器 POST26。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postpro】,进入时间历程后处理器。

(2) 定义时间历程后处理变量 2。

选择【Main Menu】>【TimeHist Postpro】>【Define Variables】,在弹出的“Define Time-

History Variables”对话框中，单击【Add】按钮，出现“Add Time-History Variables”对话框，选中【Nodal DOF Result】，单击【OK】按钮，出现的“Define Nodal Data”对象拾取框中，选中【List of Items】，在文本框中输入“1173”，即平台顶端甲板中心，然后单击【OK】按钮。出现“Define Nodal Data”对话框，在【Name】一栏中输入“UX”，在【Item, Comp】选项后的列表中选择【DOF solution】>【Translation UX】，其他选项默认，单击【OK】退出。

(3) 绘制时程—位移曲线。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Settings】>【Graph】，定义横向(X)坐标为时间，在“Graph Settings”对话框中的【XVAR】(X-axis variables)选项后选中【Single variable】，在【Single variable No.】文本框中输入“1”，单击【OK】按钮退出该对话框。

选择菜单路径项【Utility Menu】>【PlotCtrls】>【Style】>【Graphs】>【Modify Axes】，在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题，分别为“TIME”和“UX”，单击【OK】按钮退出。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Graph Variables】，弹出对话框，“NVAR1”文本框中输入“2”，单击【OK】按钮，则可绘制时间—位移曲线，如图9.19所示。

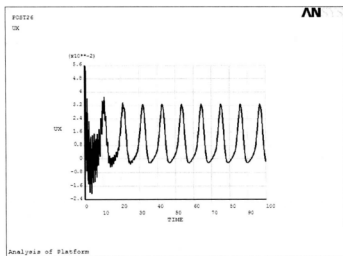


图 9.19 桩腿顶端时间—位移曲线

(4) 绘制结构主导管腿处反力—时程曲线。

选择【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Define Variables】，在弹出的“Define Time-History Variables”对话框中，单击【Add】按钮，出现“Add Time-History Variables”对话框，选中【Reaction force】，单击【OK】按钮，弹出对象拾取框中，选中【List of Items】，在文本框中输入“125”，即主导管处节点编号，然后单击【OK】按钮。

选择菜单路径项【Utility Menu】>【PlotCtrls】>【Style】>【Graphs】>【Modify Axes】，在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题，分别为“TIME”和“Reforce”，单击【OK】按钮退出。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Graph Variables】，弹出对话框中，“NVAR1”文本框中输入“3”，单击【OK】按钮，则可绘制时间—反力曲线，如图 9.20 所示。

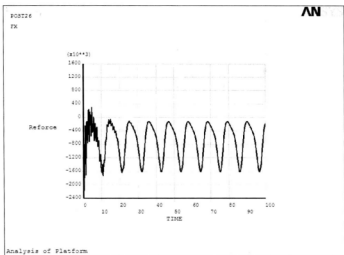


图 9.20 主导管之一时间—反力曲线

(5) 绘制结构弱点处的应力—时程曲线。

选择【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Define Variables】，在弹出的“Define Time—History Variables”对话框中，单击【Add】按钮，出现“Add Time—History Variables”对话框，选中【...by set no.】，单击【OK】按钮，弹出对象拾取框中，选中【List of Items】，在文本框中输入“125”，即连接点处节点编号，然后单击【OK】按钮。出现“Define Element Results by Seq No.”对话框，在【Name】一栏中输入“STRESS”，在【Item】选项后的列表中选择【SMISC】，在【Comp Sequence number】一栏中输入“15”，其他选项默认，单击【OK】退出。

选择菜单路径项【Utility Menu】>【PlotCtrls】>【Style】>【Graphs】>【Modify Axes】，在弹出的对话框中输入图形显示的横、纵坐标的标题，分别为“TIME”和“STRESS”，单击【OK】按钮退出。

选择菜单路径项【Main Menu】>【TimeHist Postproc】>【Graph Variables】，弹出对话框中，“NVAR1”文本框中输入“4”，单击【OK】按钮，则可绘制时间—应力曲线，如图 9.21 所示。

9.5 本章小结

本章主要介绍了海洋导管架平台的基本结构分析知识，包括平台的模型建立，结构整体静力分析，以及模态分析方法和平台在波浪载荷作用下的动力分析方法。希望通过本章的学习，读者可以掌握有关海洋平台的一些结构分析方法。

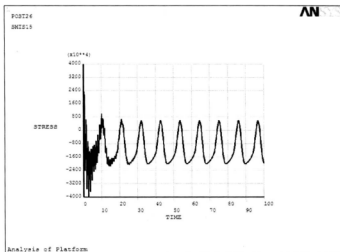


图 9.21 结构应力—时间曲线

附录：本章实例 APDL 建模及分析命令流

```

*****
海洋导管管架平台整体结构分析
*****

/FILNAME, Platform, 1 !设置工作文件名
/TITLE, Analysis of Platform !设置图形显示区域名
!***** 定义环境载荷参数
Dwater=45 !水深
H_wave=14.8 !波高
T_wave=10.8 !波周期周期
V_surface=2.35 !水面处海流速度
V_middle=1.96 !中部海流速度
V_bottom=1.60 !底部海流速度
/PREP7 !进入前处理
ET, 1, PIPE20 !定义1号单元 PIPE20
ET, 2, PIPE59 !定义2号单元 PIPE59
ET, 3, BEAM4 !定义3号单元 BEAM4
ET, 4, SHELL43 !定义4号单元 SHELL43
R, 1, 1.2, 0.050 !定义1号实常数 (PIPE20)
R, 2, 1.2, 0.050, 0.7, 2.0, 1030, 0 !定义2号实常数 (PIPE59)
R, 3, 0.78, 0.0381, 0.7, 2.0, 1030, 0 !定义3号实常数 (PIPE59)
R, 4, 0.508, 0.0254, 0.7, 2.0, 1030, 0 !定义4号实常数 (PIPE59)
R, 5, 0.16, 0.0021, 0.0021, 0.4, 0.4 !定义5号实常数 (BEAM4)
R, 6, 0.025, 0.025, 0.025, 0.025 !定义6号实常数 (SHELL43)
MP, EX, 1, 2.1E11 !设置弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3 !设置泊松比
MP, DENS, 1, 7850 !设置密度
TB, BKIN, 1, 1 !塑性设置

```

```

TBTEMP, 0
TBDATA, 1, 360E6, 0 !屈服强度设置
!***** 波流参数 Water Table
TBDE, WATE, 1
TB, WATE, 1,, 0
TBMODIF, 1, 1, 2 !选择 Stokes 五阶波理论
TBMODIF, 1, 2, 0 !选择波流耦合作用方式
TBMODIF, 1, 3, Dwater !水深
TBMODIF, 1, 4, 1030 !海水密度
TBMODIF, 1, 5, 0 !波浪作用方向
TBMODIF, 2, 1, - Dwater !海水底部坐标值
TBMODIF, 2, 2, V_bottom !底部流速
TBMODIF, 2, 3, 0 !底部海流方向
TBMODIF, 2, 4, - Dwater/2 !海水中部坐标值
TBMODIF, 2, 5, V_middle !中部流速
TBMODIF, 2, 6, 0 !中部海流方向
TBMODIF, 3, 1, 0 !海水表面坐标值
TBMODIF, 3, 2, V_surface !表面流速
TBMODIF, 3, 3, 0 !表面海流方向
TBMODIF, 14, 1, H_wave !波高
TBMODIF, 14, 2, T_wave !周期
TBMODIF, 14, 3, 0 !波浪相位角 (不同分析需设置不同值)
!***** 几何模型建立
!***** 主导管关键点
K, 1, 6, 6, 0
K, 6, 10, 10, -50
KFILL, 1, 6, 4, 2, 1, 1,
K, 7, 6, -6, 0
K, 12, 10, -10, -50
KFILL, 7, 12, 4, 8, 1, 1,
K, 13, -6, 6, 0
K, 18, -10, 10, -50
KFILL, 13, 18, 4, 14, 1, 1,
K, 19, -6, -6, 0
K, 24, -10, -10, -50
KFILL, 19, 24, 4, 20, 1, 1,
!***** 泥线以下主导管
KFILL, 5, 6, 1, 25,,
KFILL, 11, 12, 1, 26,,
KFILL, 17, 18, 1, 27,,
KFILL, 23, 24, 1, 28,,
!***** 导管架中心点
K, 29, 0, 0, 0
K, 34, 0, 0, -50
KFILL, 29, 34, 4, 30, 1, 1,
KFILL, 33, 34, 1, 35,,

```

!***** 上部甲板处主关键点

!***** 第一层甲板

K, 36, 6, 6, 8
K, 37, 6, -6, 8
K, 38, -6, -6, 8
K, 39, -6, 6, 8
K, 40, 15, 10, 8
K, 41, 15, -10, 8
K, 42, -15, -10, 8
K, 43, -15, 10, 8
K, 44, 15, 6, 8
K, 45, 15, -6, 8
K, 46, 6, -10, 8
K, 47, -6, -10, 8
K, 48, -15, -6, 8
K, 49, -15, 6, 8
K, 50, -6, 10, 8
K, 51, 6, 10, 8
K, 52, 0, 0, 8

K, 53, 15, 0, 8
K, 54, 10, -10, 8
K, 55, 0, -10, 8
K, 56, -10, -10, 8
K, 57, -15, 0, 8
K, 58, -10, 10, 8
K, 59, 0, 10, 8
K, 60, 10, 10, 8
K, 61, 10, 6, 8
K, 62, 10, 0, 8
K, 63, 10, -6, 8
K, 64, -10, -6, 8
K, 65, -10, 0, 8
K, 66, -10, 6, 8
K, 67, 0, 6, 8
K, 68, 6, 0, 8
K, 69, 0, -6, 8
K, 70, -6, 0, 8

!***** 第二层甲板

K, 71, 6, 6, 15
K, 72, 6, -6, 15
K, 73, -6, -6, 15
K, 74, -6, 6, 15
K, 75, 15, 10, 15
K, 76, 15, -10, 15
K, 77, -15, -10, 15

K, 78, -15, 10, 15
 K, 79, 15, 6, 15
 K, 80, 15, -6, 15
 K, 81, 6, -10, 15
 K, 82, -6, -10, 15
 K, 83, -15, -6, 15
 K, 84, -15, 6, 15
 K, 85, -6, 10, 15
 K, 86, 6, 10, 15
 K, 87, 0, 0, 15
 K, 88, 15, 0, 15
 K, 89, 10, -10, 15
 K, 90, 0, -10, 15
 K, 91, -10, -10, 15
 K, 92, -15, 0, 15
 K, 93, -10, 10, 15
 K, 94, 0, 10, 15
 K, 95, 10, 10, 15
 K, 96, 10, 6, 15
 K, 97, 10, 0, 15
 K, 98, 10, -6, 15
 K, 99, -10, -6, 15
 K, 100, -10, 0, 15
 K, 101, -10, 6, 15
 K, 102, 0, 6, 15
 K, 103, 6, 0, 15
 K, 104, 0, -6, 15
 K, 105, -6, 0, 15

!***** 建立线框架

!**** 主导管

LSTR, 1, 2	!1 号线
LSTR, 2, 3	!2 号线
LSTR, 3, 4	!3 号线
LSTR, 4, 5	!4 号线
LSTR, 5, 25	!5 号线
LSTR, 25, 6	!6 号线
LSTR, 7, 8	!7 号线
LSTR, 8, 9	!8 号线
LSTR, 9, 10	!9 号线
LSTR, 10, 11	!10 号线
LSTR, 11, 26	!11 号线
LSTR, 26, 12	!12 号线
LSTR, 13, 14	!13 号线
LSTR, 14, 15	!14 号线
LSTR, 15, 16	!15 号线
LSTR, 16, 17	!16 号线

LSTR, 17, 27	!17 号线
LSTR, 27, 18	!18 号线
LSTR, 19, 20	!19 号线
LSTR, 20, 21	!20 号线
LSTR, 21, 22	!21 号线
LSTR, 22, 23	!22 号线
LSTR, 23, 28	!23 号线
LSTR, 28, 24	!24 号线
! ** 第一层外围横撑	
LSTR, 1, 13	!25 号线
LSTR, 13, 19	!26 号线
LSTR, 19, 7	!27 号线
LSTR, 7, 1	!28 号线
! ** 第二层外围横撑	
LSTR, 2, 14	!29 号线
LSTR, 14, 20	!30 号线
LSTR, 20, 8	!31 号线
LSTR, 8, 2	!32 号线
! ** 第三层外围横撑	
LSTR, 3, 15	!33 号线
LSTR, 15, 21	!34 号线
LSTR, 21, 9	!35 号线
LSTR, 9, 3	!36 号线
! ** 第四层外围横撑	
LSTR, 4, 16	!37 号线
LSTR, 16, 22	!38 号线
LSTR, 22, 10	!39 号线
LSTR, 10, 4	!40 号线
! ** 第五层外围横撑	
LSTR, 5, 17	!41 号线
LSTR, 17, 23	!42 号线
LSTR, 23, 11	!43 号线
LSTR, 11, 5	!44 号线
! ** 第六层外围横撑	
LSTR, 25, 27	!45 号线
LSTR, 27, 28	!46 号线
LSTR, 28, 26	!47 号线
LSTR, 26, 25	!48 号线
! ** 第一层内部横撑	
LSTR, 1, 29	!49 号线
LSTR, 13, 29	!50 号线
LSTR, 19, 29	!51 号线
LSTR, 7, 29	!52 号线
! ** 第二层内部横撑	
LSTR, 2, 30	!53 号线
LSTR, 14, 30	!54 号线

LSTR, 20, 30	!55 号线
LSTR, 8, 30	!56 号线
! ** 第三层内部横撑	
LSTR, 3, 31	!57 号线
LSTR, 15, 31	!58 号线
LSTR, 21, 31	!59 号线
LSTR, 9, 31	!60 号线
! ** 第四层内部横撑	
LSTR, 4, 32	!61 号线
LSTR, 16, 32	!62 号线
LSTR, 22, 32	!63 号线
LSTR, 10, 32	!64 号线
! ** 第五层内部横撑	
LSTR, 5, 33	!65 号线
LSTR, 17, 33	!66 号线
LSTR, 23, 33	!67 号线
LSTR, 11, 33	!68 号线
! ** 第六层内部横撑	
LSTR, 25, 35	!69 号线
LSTR, 27, 35	!70 号线
LSTR, 28, 35	!71 号线
LSTR, 26, 35	!72 号线
! ** 外围斜撑	
LSTR, 1, 8	!73 号线
LSTR, 8, 3	!74 号线
LSTR, 3, 10	!75 号线
LSTR, 10, 5	!76 号线
LSTR, 5, 26	!77 号线
LSTR, 19, 14	!78 号线
LSTR, 14, 21	!79 号线
LSTR, 21, 16	!80 号线
LSTR, 16, 23	!81 号线
LSTR, 23, 27	!82 号线
LSTR, 7, 20	!83 号线
LSTR, 20, 9	!84 号线
LSTR, 9, 22	!85 号线
LSTR, 22, 11	!86 号线
LSTR, 11, 28	!87 号线
LSTR, 13, 2	!88 号线
LSTR, 2, 15	!89 号线
LSTR, 15, 4	!90 号线
LSTR, 4, 17	!91 号线
LSTR, 17, 25	!92 号线
! ** 甲板主导管	
LSTR, 1, 36	!93 号线
LSTR, 7, 37	!94 号线

LSTR, 19, 38	!95 号线
LSTR, 13, 39	!96 号线
LSTR, 71, 36	!97 号线
LSTR, 72, 37	!98 号线
LSTR, 73, 38	!99 号线
LSTR, 74, 39	!100 号线
!** 水面以上外圈支撑	
LSTR, 1, 37	!101 号线
LSTR, 37, 71	!102 号线
LSTR, 19, 39	!103 号线
LSTR, 39, 73	!104 号线
LSTR, 13, 36	!105 号线
LSTR, 36, 74	!106 号线
LSTR, 7, 38	!107 号线
LSTR, 38, 72	!108 号线
!** 梁结构	
LSTR, 36, 68	!109 号线
LSTR, 68, 37	!110 号线
LSTR, 37, 69	!111 号线
LSTR, 69, 38	!112 号线
LSTR, 38, 70	!113 号线
LSTR, 70, 39	!114 号线
LSTR, 39, 67	!115 号线
LSTR, 67, 36	!116 号线
LSTR, 52, 67	!117 号线
LSTR, 52, 68	!118 号线
LSTR, 52, 69	!119 号线
LSTR, 52, 70	!120 号线
LSTR, 40, 44	!121 号线
LSTR, 44, 53	!122 号线
LSTR, 53, 45	!123 号线
LSTR, 45, 41	!124 号线
LSTR, 41, 54	!125 号线
LSTR, 54, 46	!126 号线
LSTR, 46, 55	!127 号线
LSTR, 55, 47	!128 号线
LSTR, 47, 56	!129 号线
LSTR, 56, 42	!130 号线
LSTR, 42, 48	!131 号线
LSTR, 48, 57	!132 号线
LSTR, 57, 49	!133 号线
LSTR, 49, 43	!134 号线
LSTR, 43, 58	!135 号线
LSTR, 58, 50	!136 号线
LSTR, 50, 59	!137 号线
LSTR, 59, 51	!138 号线

LSTR, 51, 60	!!139 号线
LSTR, 60, 40	!!140 号线
LSTR, 59, 67	!!141 号线
LSTR, 69, 55	!!142 号线
LSTR, 58, 66	!!143 号线
LSTR, 66, 65	!!144 号线
LSTR, 65, 64	!!145 号线
LSTR, 64, 56	!!146 号线
LSTR, 50, 39	!!147 号线
LSTR, 38, 47	!!148 号线
LSTR, 51, 36	!!149 号线
LSTR, 37, 46	!!150 号线
LSTR, 60, 61	!!151 号线
LSTR, 61, 62	!!152 号线
LSTR, 62, 63	!!153 号线
LSTR, 63, 54	!!154 号线
LSTR, 49, 66	!!155 号线
LSTR, 66, 39	!!156 号线
LSTR, 36, 61	!!157 号线
LSTR, 61, 44	!!158 号线
LSTR, 57, 65	!!159 号线
LSTR, 65, 70	!!160 号线
LSTR, 68, 62	!!161 号线
LSTR, 62, 53	!!162 号线
LSTR, 48, 64	!!163 号线
LSTR, 64, 38	!!164 号线
LSTR, 37, 63	!!165 号线
LSTR, 63, 45	!!166 号线
LSTR, 78, 93	!!167 号线
LSTR, 93, 85	!!168 号线
LSTR, 85, 94	!!169 号线
LSTR, 94, 86	!!170 号线
LSTR, 86, 95	!!171 号线
LSTR, 95, 75	!!172 号线
LSTR, 84, 101	!!173 号线
LSTR, 101, 74	!!174 号线
LSTR, 74, 102	!!175 号线
LSTR, 102, 71	!!176 号线
LSTR, 71, 96	!!177 号线
LSTR, 96, 79	!!178 号线
LSTR, 92, 100	!!179 号线
LSTR, 100, 105	!!180 号线
LSTR, 105, 87	!!181 号线
LSTR, 87, 103	!!182 号线
LSTR, 103, 97	!!183 号线
LSTR, 97, 88	!!184 号线

LSTR, 83, 99	!185 号线
LSTR, 99, 73	!186 号线
LSTR, 73, 104	!187 号线
LSTR, 104, 72	!188 号线
LSTR, 72, 98	!189 号线
LSTR, 98, 80	!190 号线
LSTR, 77, 91	!191 号线
LSTR, 91, 82	!192 号线
LSTR, 82, 90	!193 号线
LSTR, 90, 81	!194 号线
LSTR, 81, 89	!195 号线
LSTR, 89, 76	!196 号线
LSTR, 78, 84	!197 号线
LSTR, 84, 92	!198 号线
LSTR, 92, 83	!199 号线
LSTR, 83, 77	!200 号线
LSTR, 93, 101	!201 号线
LSTR, 101, 100	!202 号线
LSTR, 100, 99	!203 号线
LSTR, 99, 91	!204 号线
LSTR, 85, 74	!205 号线
LSTR, 74, 105	!206 号线
LSTR, 105, 73	!207 号线
LSTR, 73, 82	!208 号线
LSTR, 94, 102	!209 号线
LSTR, 102, 87	!210 号线
LSTR, 87, 104	!211 号线
LSTR, 104, 90	!212 号线
LSTR, 86, 71	!213 号线
LSTR, 71, 103	!214 号线
LSTR, 103, 72	!215 号线
LSTR, 72, 81	!216 号线
LSTR, 95, 96	!217 号线
LSTR, 96, 97	!218 号线
LSTR, 97, 98	!219 号线
LSTR, 98, 89	!220 号线
LSTR, 75, 79	!221 号线
LSTR, 79, 88	!222 号线
LSTR, 88, 80	!223 号线
LSTR, 80, 76	!224 号线
LSTR, 52, 87	!225 号线
LSTR, 71, 44	!226 号线
LSTR, 72, 80	!227 号线
LSTR, 73, 48	!228 号线
LSTR, 74, 49	!229 号线
LSTR, 65, 100	!230 号线

LSTR, 97, 62	I231 号线
LSTR, 45, 72	I232 号线
LSTR, 36, 75	I233 号线
LSTR, 37, 76	I234 号线
LSTR, 38, 77	I235 号线
LSTR, 39, 78	I236 号线
LSTR, 57, 92	I237 号线
LSTR, 53, 88	I238 号线

! ** 一层甲板结构平面

A, 43, 49, 66, 58
A, 58, 66, 39, 50
A, 50, 39, 67, 59
A, 59, 67, 36, 51
A, 51, 36, 61, 60
A, 60, 61, 44, 40
A, 49, 57, 65, 66
A, 66, 65, 70, 39
A, 39, 70, 52, 67
A, 67, 52, 68, 36
A, 36, 68, 62, 61
A, 61, 62, 53, 44
A, 57, 48, 64, 65
A, 65, 64, 38, 70
A, 70, 38, 69, 52
A, 52, 69, 37, 68
A, 68, 37, 63, 62
A, 62, 63, 45, 53
A, 48, 42, 56, 64
A, 64, 56, 47, 38
A, 38, 47, 55, 69
A, 69, 55, 46, 37
A, 37, 46, 54, 63
A, 63, 54, 41, 45

! ** 二层甲板结构平面

A, 78, 84, 101, 93
A, 93, 101, 74, 85
A, 85, 74, 102, 94
A, 94, 102, 71, 86
A, 86, 71, 96, 95
A, 95, 96, 79, 75
A, 84, 92, 100, 101
A, 101, 100, 105, 74
A, 74, 105, 87, 102
A, 102, 87, 103, 71
A, 71, 103, 97, 96
A, 96, 97, 88, 79

A, 92, 83, 99, 100
 A, 100, 99, 73, 105
 A, 105, 73, 104, 87
 A, 87, 104, 72, 103
 A, 103, 72, 98, 97
 A, 97, 98, 80, 88
 A, 83, 77, 91, 99
 A, 99, 91, 82, 73
 A, 73, 82, 90, 104
 A, 104, 90, 81, 72
 A, 72, 81, 89, 98
 A, 98, 89, 76, 80
 !***** 有限元模型网格划分
 !** 水面以下泥线以上主导管
 LSEL, S,,, 1, 5 ! 从全部对象中选中 1-5 号线
 LSEL, A,,, 7, 11 ! 继续选中 7-11 号
 LSEL, A,,, 13, 17 ! 继续选中 13-17 号
 LSEL, A,,, 19, 23 ! 继续选中 19-23 号
 LATT, 1, 2, 2 ! 为已选中的线分配材料模型、实常数、单元类型
 LESIZE, ALL,,, 6 ! 将已选中的线每条划分为 5 份
 LMESH, ALL ! 线单元划分
 !** 泥线以下主导管
 LSEL, S,,, 6 ! 从全部对象中选中 6 号线
 LSEL, A,,, 12 ! 继续选中 12 号
 LSEL, A,,, 18 ! 继续选中 18 号
 LSEL, A,,, 24 ! 继续选中 24 号
 LATT, 1, 1, 1 ! 为已选中的线分配材料模型、实常数、单元类型
 LESIZE, ALL,,, 2 ! 将已选中的线每条划分为 2 份
 LMESH, ALL ! 线单元划分
 !** 层外围横支撑与水面以上主导管 PIPE59
 LSEL, S,,, 25, 48 ! 从全部对象中选中 25-48 号线
 LSEL, A,,, 93, 100
 LATT, 1, 3, 2 ! 为已选中的线分配材料模型、实常数、单元类型
 LESIZE, ALL,,, 6 ! 将已选中的线每条划分为 4 份
 LMESH, ALL ! 线单元划分
 !** 内围横支撑与外围斜向支撑 PIPE59
 LSEL, S,,, 49, 92 ! 从全部对象中选中 49-72 号线
 LSEL, A,,, 101, 108 ! 继续选中 101-108 号线
 LSEL, A,,, 226, 238
 LATT, 1, 4, 2 ! 为已选中的线分配材料模型、实常数、单元类型
 LESIZE, ALL,,, 8 ! 将已选中的线每条划分为 5 份
 LMESH, ALL ! 线单元划分
 !** 梁结构
 LSEL, S,,, 109, 225 ! 从全部对象中选中 109-232 号线
 LATT, 1, 5, 3,,, 1 ! 为已选中的线分配材料模型、实常数、单元类型
 LESIZE, ALL,,, 6 ! 将已选中的线每条划分为 6 份

```

LMESH, ALL           ! 线单元划分
! ** 甲板平面结构
ASEL, A, , , ALL     ! 选中所有面
AATT, 1, 6, 4        ! 为已选面分配材料模型、实常数、单元类型
AMESH, ALL           ! 面划分
/ESHAPE, 1.0         ! 打开模型形状控制开关
NUMMRG, NODE, , , , LOW ! 合并重合节点
NUMCMP, ALL          ! 压缩编号
FINISH

! **** 波流耦合值搜索
*DIM, WLX, ARRAY, 361, 1, 1, , , ! 定义用于储存相位角的一维数组
*DIM, WLFX, ARRAY, 361, 1, 1, , , ! 定义用于储存波流耦合力值的一维数组
*DO, I, 0, 360, 1     ! 定义相位角范围 0°~360°, 并开始循环
*SET, WLX(I+1), I     ! 将相位角值储存于 WLX 数组
/PREP7               ! 进入前处理模块
NSEL, S, LOC, Z, -50
CP, , ALL, ALL
ALLSEL
D, 125, ALL
ACEL, 0, 0, 9.8
FINISH

TBDATA, 81, I        ! 将相位角取值赋予 Water Table
/SOLU                ! 进入求解计算模块
TIME, 1              ! 定义结束结束时间
SOLVE                ! 开始求解
*GET, RFX, NODE, 125, RF, FX ! 提取该节点 X 方向的反力
*SET, WLFX(I+1), -(RFX) ! 将所提取的反力取相反数后储存于 WLFX 数组
*ENDDO               ! 结束循环
*CREATE, ANSUO        ! 创建一个文件
*CFOPEN, ' RFORCE', ' OUT', * ! 打开文件
*VWRITE, WLX(1), WLFX(1), , , , , , ! 写入文件
(3F15.4)
!
*CFCLOS
*END
/INPUT, ANSUO
! ***** 静力计算过程
/SOLU                ! 进入求解计算模块
ANTYPE, 0            ! 设置求解类型为结构静力分析
NSEL, S, LOC, Z, -50 ! 选中 Z=-50 处的节点
D, ALL, ALL          ! 约束所选节点全部自由度
ALLSEL               ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8      ! 施加重力载荷
SOLVE                ! 执行求解
SAVE                 ! 保存求解结果
FINISH               ! 退出求解计算模块
! ***** 静力分析后处理过程

```

```

/POST1                      ! 进入通用后处理器
SET, LAST                   ! 读入计算结果文件
/ESHAPE, 1.0                ! 打开模型形状开关
PLDISP, 0                   ! 绘制结构整体变形图
PLNSOL, U, SUM, 0, 1.0      ! 绘制结构位移等值图
PLNSOL, S, EQV, 0, 1.0      ! 绘制结构等效应力分布云图
!***** 模态分析计算
/SOLU                        ! 进入求解模块
ANTYPE, MODAL               ! 设置分析类型为模态分析
MODOPT, LANB, 6             ! 模态分析选项
MXPAND, 6                   ! 设置扩展 6 阶模态
NSEL, S, LOC, Z, -50        ! 选中 Z = -50 处的节点
D, ALL, ALL                 ! 约束所选节点全部自由度
ALLSEL                       ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8
SOLVE                       ! 开始模态求解
SAVE                         ! 保存求解结果
FINISH                       ! 退出求解模块
!***** 模态分析后处理
/POST1                      ! 进入通用后处理器
ESHAPE, 1.0                ! 打开结构形状开关
SET, LIST                   ! 列表显示结构自振频率计算结果
SET, FIRST                  ! 读入一阶模态
PLDISP, 0                   ! 显示结构一阶模态
SET, NEXT                   ! 读入二阶模态
PLDISP, 0                   ! 显示结构二阶模态
SET, NEXT                   ! 读入三阶模态
PLDISP, 0                   ! 显示结构三阶模态
SET, NEXT                   ! 读入四阶模态
PLDISP, 0                   ! 显示结构四阶模态
FINISH                      ! 退出后处理模块
!**** 波浪载荷作用下瞬态动力分析
/PREP7                      ! 进入前处理模块
TB, 81, 0                   ! 修改 WATERTABLE 里的波浪相位角为 0°
/SOLU                        ! 进入求解计算模块
ANTYPE, TRANS               ! 设置求解类型为瞬态动力分析
ALPHAD, 0.1575              ! 设置阻尼系数  $\alpha$ 
BETAD, 2.5389E-03           ! 设置阻尼系数  $\beta$ 
TRNOPT, FULL                ! 设定瞬态动力求解方法
NLGEOM, ON                  ! 打开大变形开关
NSUBST, 1, ..., 1
NSEL, S, LOC, Z, -50        ! 选中 Z = -50 处的节点
D, ALL, ALL                 ! 约束所选节点全部自由度
ALLSEL                       ! 选中所有对象
ACEL, 0, 0, 9.8
*DO, I, 10E-12, 100, 0.2    ! 设定结束时间及子步时间开始循环计算

```

```

TIME, I           ! 循环计算结束时间
OUTPES, ALL, ALL  ! 输出结果设置
SOLVE, SAVE       ! 执行求解并保存
*ENDDO           ! 结束循环求解计算
!***** 时程后处理过程
/POST26           ! 进入时程后处理器 POST26
NSOL, 2, 1173, U, X, Deflection ! 定义 1 号节点处的 X 方向位移为 2 号时程变量
/AXLAB, X, TIME    ! 定义 X 轴标题
/AXLAB, Y, UX      ! 定义 Y 轴标题
PLVAR, 2           ! 绘制时程位移曲线
ESOL, 3, 125, , SMIS, 15, STRESS ! 定义 17 号单元的等效应力为 3 号时程变量
/AXLAB, X, TIME    ! 定义 X 轴标题
/AXLAB, Y, Stress  ! 定义 Y 轴标题
PRVAR, 3           ! 绘制时程应力曲线
FINISH            ! 退出 POST26

```


参 考 文 献

- 1 龚曙光主编. ANSYS 工程应用实例解析. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 2 博嘉科技编著. 有限元分析软件—ANSYS 融会与贯通. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- 3 尚晓峰编著. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- 4 李路. 海洋石油工业的发展. 科技创新导报, 2007, (33): 153
- 5 任克忍. 海洋石油水下装备现状及发展趋势. 石油机械, 2008, (9): 151 ~ 153
- 6 李茜, 杨树耕. 采用 ANSYS 程序的自升式平台结构有限元动力分析. 中国海洋平台, 2003, (4): 41 ~ 46
- 7 杨进, 刘书杰, 周建良. 风浪流作用下隔水导管强度及安全性计算. 中国海上油气, 2006, (3): 198 ~ 200
- 8 廖彦波, 杨进. 双圆夹层钢管混凝土在钻井隔水导管中的应用. 钢结构, 2008, (12): 47 ~ 52
- 9 张建勇. 浅海独桩平台有限元分析及合理结构型式研究. 硕士论文. 2005, 35 ~ 56
- 10 韩志强. 海洋平台桩基计算与施工方法探讨. 中国海洋平台, 2002, (6): 28 ~ 31
- 11 刘庭权, 等. 基于桩—土—结构相互作用的海洋平台结构抗震优化设计. 船舶力学, 2004, (4): 80 ~ 85
- 12 卢成原. 考虑群桩效应的海洋平台桩—土结构共同工作研究. 海洋工程, 1996, (1): 7 ~ 10
- 13 黄熠, 萧林, 李炎军. 单筒三井技术在涠洲 6-1 油田的应用. 石油钻采工艺, 2007, (6): 1 ~ 3